

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Babić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Nikola Babić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i stručnom vođenju kroz izradu završnog rada.

Hvala asistentici mag. ing. mech. Maji Jurici na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Za kraj, posebna zahvala mojoj obitelji te djevojci Katarini na punoj podršci i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Nikola Babić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **NIKOLA BABIĆ**

Mat. br.: **0035187198**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA DINAMIČKE KARAKTERISTIKE MAG CBT ZAVARIVANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF DINAMIC CHARACTERISTIC IN MAG CBT WELDING PROCESS**

Opis zadatka:

Proučiti prijenose metala u električnom luku pri MAG zavarivanju te posebno analizirati CBT- Controlled Bridge Transfer. Usporediti konvencionalan način prijenosa metala kratkim spojevima i CBT sa stanovišta zaštitnih plinova, dodatnih materijala i same primjene. Opisati izvor struje za MAG CBT zavarivanje i karakteristike.

U eksperimentalnom dijelu snimanjem dinamičke karakteristike odrediti raspon prijenosa metala kratkim spojevima u okviru MAG CBT zavarivanja za čisti CO₂ te za mješavinu Ar 82% / CO₂ 18%. Analizirati osnovne značajke faze kratkog spoja i električnog luka ovisno o vrsti plina i struji zavarivanja. Definirati kritični prag pri kojem CBT ne može kontrolirati kratke spojeve i usporediti sa konvencionalnim prijenosom metala. Predložiti opcije za razvoj i primjenu MAG CBT zavarivanja u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE	2
2.1. Prijenos metala u električnom luku.....	4
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima	4
2.1.2. Prijenos metala prijelaznim lukom	6
2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	7
2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom.....	8
2.2. Zaštitni plinovi i plinske mješavine	10
3. CONTROLLED BRIDGE TRANSFER (CBT).....	13
3.1. EN-CBT postupak.....	17
3.2. AC-CBT postupak.....	18
3.3. CBT-EX postupak.....	20
3.4. Izvor struje za CBT postupak zavarivanja	23
3.5. Snimanje dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$ pri MAG CBT navarivanju	26
4. EKSPERIMENTALNI RAD.....	28
4.1. Izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L	31
4.2. Snimanje dinamičke karakteristike pri navarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 82 %Ar / 18 %CO ₂	33
4.3. Snimanje dinamičke karakteristike pri navarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 100 % CO ₂	43
4.4. Analiza jakosti struje ovisno o vrsti plina i brzini dodavanja žice.....	52
5. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA.....	57
PRILOZI.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Proces taljenja kod MAG postupka [4]	2
Slika 2.	Oprema za MAG zavarivanje [1]	3
Slika 3.	Prijenos metala kratkim spojem [7].....	5
Slika 4.	Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [8]	5
Slika 5.	Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [7].....	7
Slika 6.	Prijenos metala štrcajućim lukom [7].....	8
Slika 7.	Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [9].....	9
Slika 8.	Utjecaj zaštitnih plinova na oblik zavora [1].....	11
Slika 9.	Utjecaj zaštitnih plinova i mješavina na dubinu penetracije [1]	11
Slika 10.	Princip rada CBT metode zavarivanja [10]	13
Slika 11.	Kriterij predviđanja uspostave električnog luka [11].....	15
Slika 12.	CBT prijenos metala u realnom vremenu snimljen visokobrzinskom kamerom [12]	16
Slika 13.	Usporedba zavarivanja konvencionalnim MAG i CBT MAG [12]	17
Slika 14.	Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [12].....	18
Slika 15.	Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [13]	20
Slika 16.	Princip CBT-EX tehnologije MIG/MAG zavarivanja [14].....	21
Slika 17.	Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT – EX i klasičnom MAG zavarivanju [14]	22
Slika 18.	Protok zraka kroz Welbee izvor struje [16].....	25
Slika 19.	Welbee digitalni inverter P500L s robotskom rukom [14].....	25
Slika 20.	Dinamička karakteristika (prikaz napona i struje) za MAG CBT postupak zavarivanja.....	26
Slika 21.	Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb	28
Slika 22.	Osciloskop Tetronix TDS 210 [2]	29
Slika 23.	Shema spajanja mjerne opreme [20]	30
Slika 24.	Kabel za povratnu vezu potreban kod „Low spatter“ načina rada [2].....	30
Slika 25.	Sučelje za podešavanje načina rada i parametre zavarivanja - OTC Daihen Welbee P500L	31
Slika 26.	Izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L	32
Slika 27.	Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala (82% Ar / 18% CO ₂)	34
Slika 28.	Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO ₂)	35
Slika 29.	Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri klasičnom načinu prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	36
Slika 30.	Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	37
Slika 31.	Promjena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	39
Slika 32.	Promjena vremena trajanja kratkog spoja o brzini dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	39
Slika 33.	Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO ₂)	40

Slika 34.	Promjena vremena trajanja kratkog spoja u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO ₂)	41
Slika 35.	Grafikon usporedbe frekvencija kod CBT i klasičnog načina prijenosa u ovisnosti o brzini dodavanja žice u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO ₂	42
Slika 36.	Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri modificiranom CBT prijenosu metala (100% CO ₂)	44
Slika 37.	Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 7 m/min (100% CO ₂).....	45
Slika 38.	Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri klasičnom načinu prijenosa metala (100% CO ₂)	46
Slika 39.	Oscilogram dinamičke karakteristike $u_i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 4 m/min (100% CO ₂)	47
Slika 40.	Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (100% CO ₂)	48
Slika 41.	Promjena vremena trajanja perioda kratkih spojeva u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (100% CO ₂)	49
Slika 42.	Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (100% CO ₂).....	50
Slika 43.	Promjena vremena trajanja perioda kratkih spojeva u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranoga CBT načina prijenosa metala (100% CO ₂) ..	50
Slika 44.	Grafikon usporedbe frekvencija kod CBT i klasičnog načina prijenosa u ovisnosti o brzini dodavanja žice u zaštitnoj atmosferi 100 % CO ₂	51
Slika 45.	Grafikon vrijednosti jakosti struja zavarivanja u ovisnosti o brzini dodavanja žice	52
Slika 46.	Pad jakosti struje za vrijeme perioda električnog luka pri različitim vrijednostima brzina dodavanja žice	53
Slika 47.	Oscilogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$, pri modificiranom CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 8 m/min (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	54
Slika 48.	Oscilogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO ₂).....	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela zaštitnih plinova za MAG – zavarivanje po HRN EN 439 i njihova primjena [10]	10
Tablica 2. Parametri zavarivanja AC-CBT metodom prijenosa metala [13]	19
Tablica 3. Generacije invertera za izvor zavarivanja [14].....	24
Tablica 4. Tehnički podaci izvora struje za zavarivanje [15].....	32
Tablica 5. Parametri navarivanja u zaštitnoj atmosferi 82 %Ar / 18 %CO ₂	33
Tablica 6. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod klasičnog i CBT načina prijenosa metala za mješavinu 82 % Ar / 18 % CO ₂	38
Tablica 7. Parametri navarivanja u zaštitnoj atmosferi 100 % CO ₂	43
Tablica 8. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod klasičnog i CBT načina prijenosa metala za zaštitni plin 100 % CO ₂	48

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
AC	Alternating current
AC – CBT	Alternating current – CBT
AC – MAG	Alternating current – MAG
Ar	Argon
CO	Ugljični monoksid
CO ₂	Ugljični dioksid
CBT	Controlled bridge transfer
CBT – EX	Controlled bridge transfer – expanded
DC	Direct current
EN – CBT	Electrode negative – CBT
FPGA	Field Programmable Gate Array
He	Helij
IIW	International Institute of Welding
MAG	Metal active gas
MAGk	Metal active gas, short arc
MAGi	Metal active gas, mixed arc
MIG	Metal inert gas
O ₂	Kisik
WB	Welbee
Welbee	Welding best electronic engine

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje zavarivanja
Q	J	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
t	s	Vrijeme
U	V	Napon
$v_{\text{ž}}$	m/min	Brzina dodavanja žice

SAŽETAK

U radu je opisan MAG postupak zavarivanja te su opisani načini prijenosa metala u električnom luku pri MAG zavarivanju. Posebno je opisan princip rada, dinamičke karakteristike i izvor struje kod MAG CBT (Controlled Bridge Transfer) načina prijenosa metala. Uspoređen je konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojevima i CBT način prijenosa sa stanovišta zaštitnih plinova, dodatnih materijala i same primjene. Nakon obrade teorijskog dijela, izveden je eksperimentalni rad.

U eksperimentalnom dijelu, koji je izveden u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, izvršeno je određivanje raspona prijenosa metala kratkim spojevima u okviru MAG CBT zavarivanja za čisti CO₂ te za mješavinu Ar 82% / CO₂ 18%. Tijekom izvođenja rada definiran je kritični prag pri kojem CBT način prijenosa metala postaje nestabilan i dolazi do pojave štrcanja te je uspoređen s konvencionalnim prijenosom metala.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, načini prijenosa metala, CBT zavarivanje, dinamička karakteristika izvora struje

SUMMARY

In this paper MAG welding procedure is defined and metal transfer modes in electric arc are described. Especially is presented working principle, external characteristic and power source of MAG CBT (Controlled Bridge Transfer) metal transfer method. CBT method is compared to conventional short circuit transfer from the point of shielding gas, welding materials and the application. After processing the theoretical part, experimental work is performed.

In experimental part, which was performed in Laboratory for welding, Faculty of mechanical engineering and naval architecture, University of Zagreb, determining the transmission range of short circuit MAG CBT transfer was carried out for pure CO₂ and for mixture of 82% Ar / 18% CO₂. During the execution of the work, the critical limit at which the CBT metal transfer becomes unstable and spatter occurs is defined and compared with conventional metal transfer.

Key words: MAG welding, metal transfer modes, CBT welding process, power source dynamic characteristic

1. UVOD

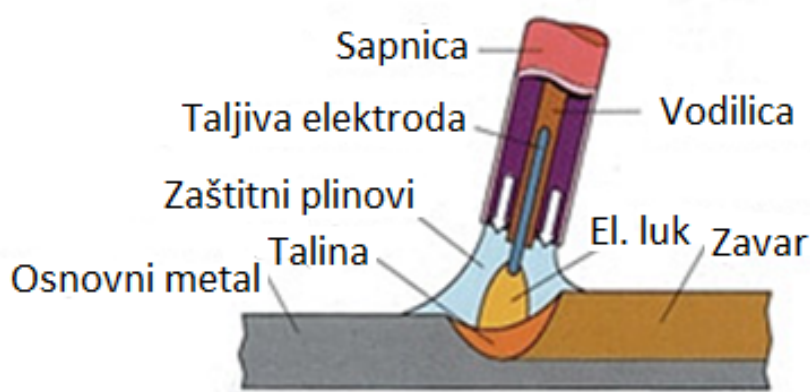
Zavarivanje je danas nezaobilazna tehnologija spajanja materijala u gotove proizvode koji su nužno potrebni čovjeku (automobili, kotlovi, brodovi, termoenergetska postrojenja i ostale konstrukcije). Pred tehnologa zavarivanja su postavljeni različiti zahtjevi. Prije svega to su zahtjevi kvalitete i pouzdanosti (sigurnosti) zavarenog spoja na konstrukciji, minimalnih troškova izrade, minimalanog utroška materijala i energije te minimalnog onečišćenja okoliša. Zbog želje da se mnogi od tih zahtjeva zadovolje razvijen je MAG postupak zavarivanja. MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (MAG – Metal Active Gas) [1]. Postupak se razvio poslije 2. svjetskog rata u SAD-u, u avioindustriji (tvrtka Airco), a malo poslije i u SSSR-u gdje je prvi put upotrebljen CO₂ kao zaštitni plin umjesto argona. MAG postupak zavarivanja je danas jedan od najčešće korištenih postupaka spajanja metala. Razvijen je zbog potrebe za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih spojeva, a brzo se proširio zbog pogodnosti za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju. Prema standardu HRN EN ISO4063 MAG zavarivanje ima oznaku 135. Unatoč šezdesetogodišnjoj povijesti, MAG zavarivanje se i danas stalno unapređuje, u potrazi za što ekonomičnijim i kvalitetnijim izvođenjem samog postupka [1].

Razvojem velikog broja modificiranih postupaka MAG zavarivanja žele se zadovoljiti visoke razine eksploatacijskih karakteristika kao i eliminacija problema poput štrcanja. Jedan od modificiranih postupaka je i CBT – Controlled Bridge Transfer koji predstavlja iskorak u razvoju MAG postupka. MAG CBT je modificirani način prijenosa metala koji kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MIG/MAG zavarivanja. CBT tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljina manjih od promjera dodatnog materijala [2].

U radu su pobliže opisani načini prijenosa metala pri MAG postupku zavarivanja u svrhu lakšeg razumijevanja principa rada MAG CBT postupka. Kako bi se u potpunosti vidjele prednosti i nedostaci te primjena CBT metode, u radu su još uspoređeni konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojevima i CBT sa stanovišta zaštitnih plinova, dodatnih materijala i same primjene.

2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE

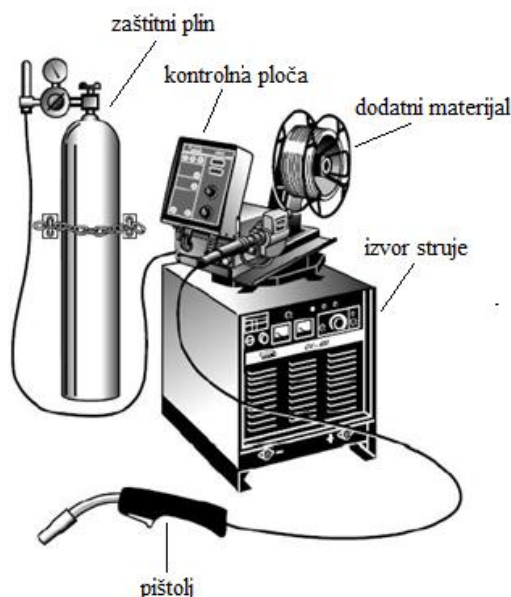
MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina [1]. Toplina električnog luka se koristi za taljenje osnovnog i dodatnog materijala. Električni luk je trajno i snažno pražnjenje (izbijanje) u ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koje potječu prvenstveno od metala elektrode, obloge, zaštitnih plinova ili praškova tijekom elektrolučnog zavarivanja. Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice spojene na (+) pol istosmjernog izvora i radnog komada u zaštitnoj atmosferi plinova. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Primjenom aktivnog plina dolazi do reakcije između plina (CO_2 ili mješavine $\text{Ar} / \text{CO}_2 / \text{O}_2$) i rastaljenog metala. Zaštitni plin utječe na električno – fizikalna svojstva električnog luka (prijenos metala), metalurške procese u talini zavora i tehnološke parametre. Svrha zaštitnog plina je da štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a na mjesto zavarivanja se dovode kroz posebnu sapnicu na pištolju [3]. Na slici 1 je prikazano MAG zavarivanje te proces taljenja elektrode koja se kontinuirano dovodi kroz sapnicu.



Slika 1. Proces taljenja kod MAG postupka [4]

Uređaj za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom, polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim

plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina. Na slici 2 prikazana je oprema potrebna za MAG zavarivanje.



Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [1]

MAG postupak zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke u odnosu na ostale postupke zavarivanja. Prednosti MAG postupka su: postupak je primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala; velika je mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala; zavarivanje je moguće izvesti u svim položajima; mogućnost primjene različitih plinskih mješavina; širok raspon debljina materijala koji se zavaruje; velika učinkovitost i proizvodnost; pogodan za automatizaciju itd. Nedostaci MAG postupka su: kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin); problemi se mogu javiti kod dovođenja žice; štrcanje kod nekih vrsta prijenosa metala (kratki spojevi); složeniji uređaji itd.

Parametri zavarivanja koji u najvećoj mjeri utječu na kvalitetu zavarenog spoja [3]:

- Jakost struje (brzina dodavanja žice),
- Napon električnog luka,
- Veličina induktiviteta (uspona struje),
- Promjer žice,
- Brzina zavarivanja,
- Protočna količina i vrsta zaštitnog plina,
- Dužina slobodnog kraja žice.

2.1. Prijenos metala u električnom luku

Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom rastaljeni se metal s elektrodne žice prenosi u obliku kapljica koje se mogu prenositi premošćivanjem ili slobodnim letom. Prijenos metala premošćivanjem obuhvaća prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala prijelaznim lukom dok slobodnim letom kapljice se mogu prenositi štrcajućim lukom ili pomoću impulsnih struja. Prijenos metala se odvija u tri faze: taljenje vrha elektrodne žice i odvajanje kapljice, slobodni let kapljice kroz električni luk te sjedinjenje kapljice s talinom u zavarenom spoju. Prijenos metala kod MAG zavarivanja ovisi o tipu dodatnog materijala, naponu, jakosti struje, polaritetu elektrode, slobodnom kraju žice te o zaštitnom plinu.

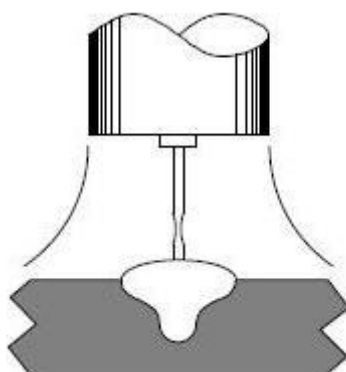
Zbog velikog napretka u razvoju prijenosa metala u posljednjih 10 godina dotadašnje klasifikacije nisu više odgovarale prijenosu metala kod novih postupaka. Prema novom prijedlogu klasifikacije predloženom od strane IIW-a (eng. International Institute of Welding) 2007. definirana su tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom [5]:

- Prirodni prijenos,
- Kontrolirani prijenos,
- Modificirano (prošireno) područje prijenosa.

Svakom ovom području pripadaju određene grupe koje obuhvaćaju načine prijenosa materijala sa sličnim karakteristikama.

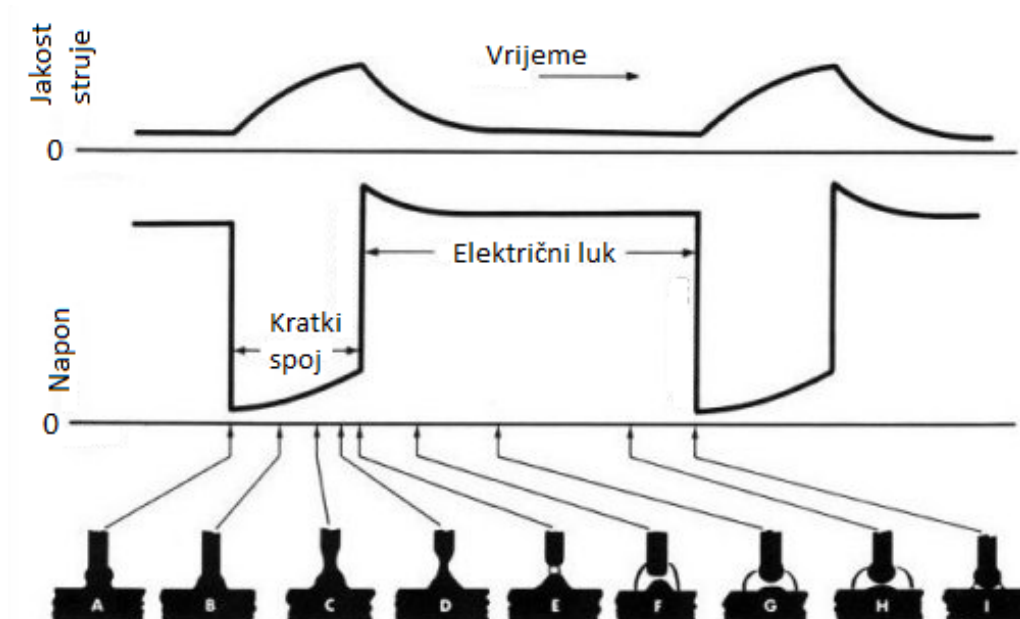
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima (eng. Short Arc, oznaka MAGk) je način prijenosa metala kada žica za vrijeme kratkog spoja dodiruje talinu zavora i to se ponavlja periodički. Kod prijenosa kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja (od 50 do 170 A), niski naponi (od 13 do 21 V) i elektrodne žice malih promjera (od 0.6 do 1.2 mm), zaštitni plin CO₂ ili mješavine (CO₂+Ar, CO₂+Ar+O₂) [6]. Na slici 3 je prikazan prijenos metala koji se javlja kad se uspostavi kratki spoj između žice i taline, odnosno radnog komada.



Slika 3. Prijenos metala kratkim spojem [7]

Slika 4 prikazuje princip prijenosa metala kratkim spojevima u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i naponu po fazama (A – I).



Slika 4. Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [8]

A – stanje kada žičana elektroda dotakne radni komad, u električnom krugu nastane kratki spoj – napon pada na nulu, struja počinje eksponencijalno rasti (brzina rasta je ograničena induktivnim otporima kruga)

B,C,D – napon polako raste zbog povećanja otpora do kojeg dolazi jer povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt $Q = I^2 \cdot R$ sve do taljenja) i povećava se

„pinch – efekt“ koji dovodi do smanjenja presjeka žice (povećani otpor) i otkidanja zagrijanog vrha žice

E – prekida se kratki spoj i uspostavlja se opet električni luk, a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost

F,G,H – skok napona je opet nešto veći od nominalnog zbog induktiviteta krugova i s vremenom se smanjuje na nominalnu vrijednost (G,H)

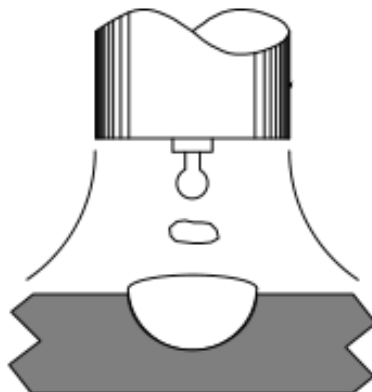
I – trenutak neposredno prije nego žica dotakne radni komad i uspostavi se kratki spoj

Sve ove faze se zbivaju dok se žičana elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od faze A. Broj ciklusa po sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i pri stabilnim parametrima ima $100 \div 200$ kratkih spojeva u sekundi [3]. Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od tankih do debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Izrazito je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Kratki spojevi se primjenjuju kod zavarivanja gdje je zahtijevana minimalna deformacija radnog komada. Prijenos kratkim spojevima se lako zvučno prepozna po karakterističnom pucketanju ako se radi s pravilnim parametrima i uvjetima. Ovakav način prijenosa metala ima i neke nedostatke: mali učin taljenja i više prskanja radi slabije kontrole procesa [7]. Zbog ovih nedostataka su se razvili novi modificirani načini kontrole prijenosa metala.

2.1.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom (eng. mixed arc, oznaka MAGi) je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri dolazi do pojave kratkih spojeva. Koriste se veće struje (od 170 do 235 A) i naponi (od 22 do 25 V) u odnosu na način prijenosa metala kratkim spojevima. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Posljedica toga je više prskanja, neregularnost (pojava kratkih spojeva je slučajna i izaziva nepredvidivo štrcanje materijala), položaj zavarivanja je ograničen na ravne i horizontalne položaje. Prijenos prijelaznim lukom je također ograničen na minimalnu debljinu materijala od 3 mm ili deblji [7]. Zbog svih nabrojanih nedostataka ovakav prienos metala se izbjegava te se pokušava zamijeniti nekim modificiranim prijenosima gdje je manje prskanja i manje nastalih dimnih plinova.

Na slici 5 prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala prije prijelaznim lukom gdje je vidljivo da je promjer kapljice veći od promjera žice.

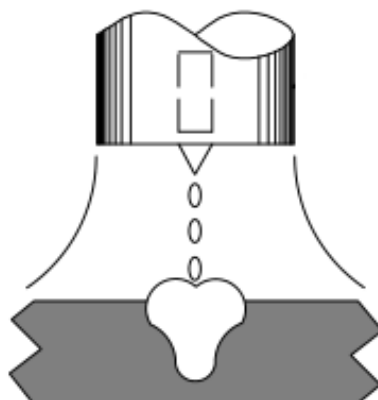


Slika 5. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [7]

2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira prijenos puno malih kapljica koji se vrši slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon (od 24 do 40 V), struja (od 200 do 600 A) i brzina dovođenja žice u usporedbi s prijenosom kratkim spojevima. Potrebna je dosta velika energija kako bi se ostvarile velike sile („pinch-efekt“) i kako bi se zagrijavanjem ili nekim drugim načinom smanjile sile površinske napetosti koje utječu na veličinu kapljice metala. Da bi se ostvario kvalitetan štrcajući luk potrebno je koristiti zaštitni plin bogat argonom [7]. Jasno se može uočiti kada se ostvaruju uvjeti za prijenos štrcajućim lukom te se struja pri kojoj se to desi naziva kritičnom strujom i ona je svojstvena za određene zaštitne plinove i njihovim se sastavom može utjecati na njenu veličinu.

Na slici 6 je prikazan pojednostavljeni shematski prikaz prijenos metala štrcajućim lukom gdje je promjer kapljice manji od promjera žice.



Slika 6. Prijenos metala štrcajućim lukom [7]

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su veliki depozit, velika penetracija, lijep izgled zavora, mogućnost korištenja većih promjera žice te malo nepoželjnog prskanja.

Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od prokapljivanja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala od 3 mm i debljih) i opasnost od cijedenja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile [7].

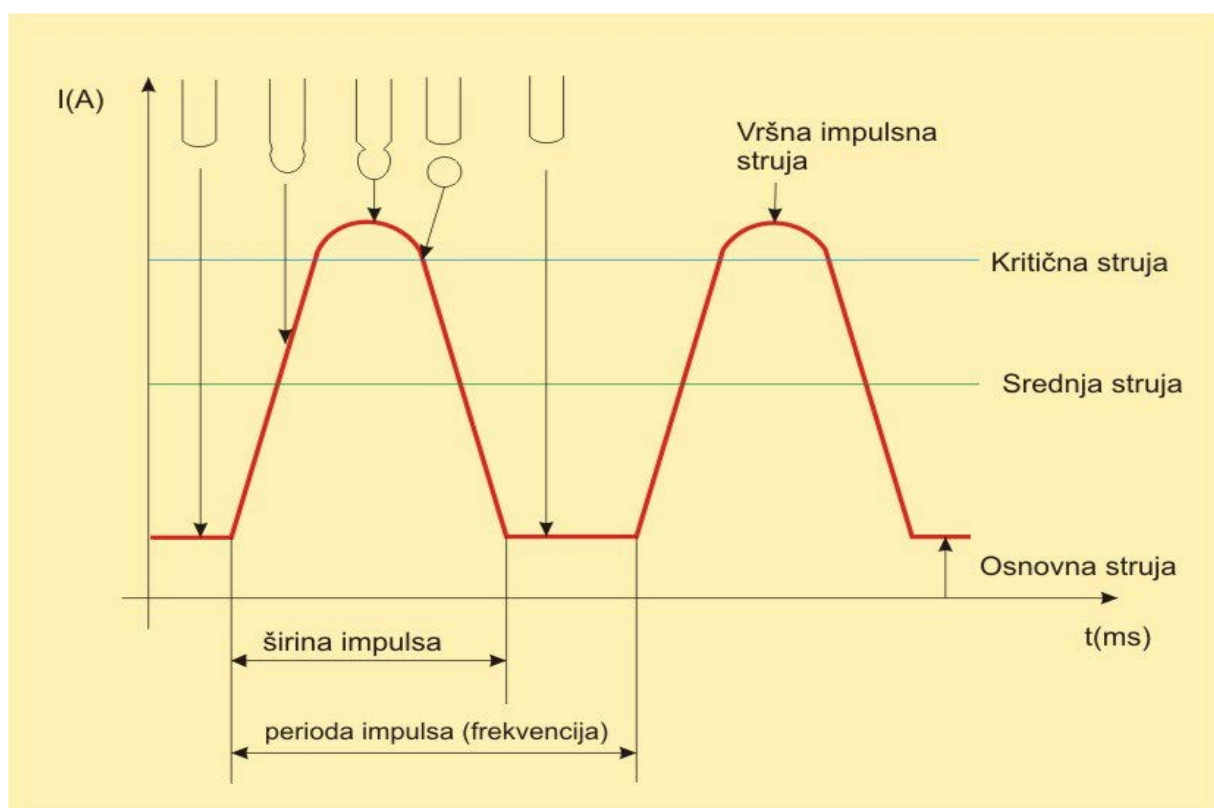
2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom je po mehanizmu prijenosa kapljica u talinu sličan prijenosu štrcajućim lukom. Kod oba prijenosa metal se prenosi slobodnim letom kapljica, bez kratkih spojeva. Kod prijenosa metala impulsnim lukom izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom od 20 – 300 Hz) [9].

Impulsnim načinom se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja. Daljnje mogućnosti razvoja postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnog oblika što znači utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice [9]. U praksi se kod zavarivanja koriste sinusoidni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja

elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja. Kod prijenosa metala impulsnim lukom zahtijevani promjer elektrode je od 0,8 – 1,6 mm te kod praškom punjenih elektroda 1,1 – 2 mm. Kod ugljičnih čelika koristi se mješavina s najviše 18% CO₂ [1].

Prosječna struja zavarivanja je manja od kritične struje koja bi dala nepravilan i neprihvatljiv prijenos u grubim kapima, modulira se jačom strujom određene frekvencije tako da varira između neke minimalne (osnovne) i maksimalne struje (struja impulsa). Osnovna struja održava električni luk, dok je duljina trajanja i visina impulsa vršne struje prilagođena da premaši kritičnu struju i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Na slici 7 je prikazana promjena jakosti struje o vremenu i način otkidanja kapljice.



Slika 7. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [9]

Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnog zavarivanja [9]:

- Vršna impulsna struja koja se kreće u granicama 250 – 650 A;
- Osnovna struja služi da onemogući gašenje luka nakon prestanka impulsa, a kreće se u granicama 20 – 50 A;
- Širina impulsa koja se kreće u granicama 1 – 3 ms;
- Frekvencija je parametar koji zapravo određuje broj kapljica u sekundi;

- Brzina dodavanja žice.

Impulsni način prijenosa zadržava prednosti, a otklanja poteškoće štrcajućeg luka tako da se može primjeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. Primjenom određenog promjera žice moguće je zavariti širok raspon debljina materijala [3].

2.2. Zaštitni plinovi i plinske mješavine

Zaštitni plinovi štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a na mjesto zavarivanja se dovode kroz posebnu sapnicu na pištolju. Zaštitni plinovi imaju direktan utjecaj na [3]:

- Električno – fizikalna svojstva električnog luka (prijenos metala);
- Metalurške procese u talini zavara;
- Tehnološke parametre.

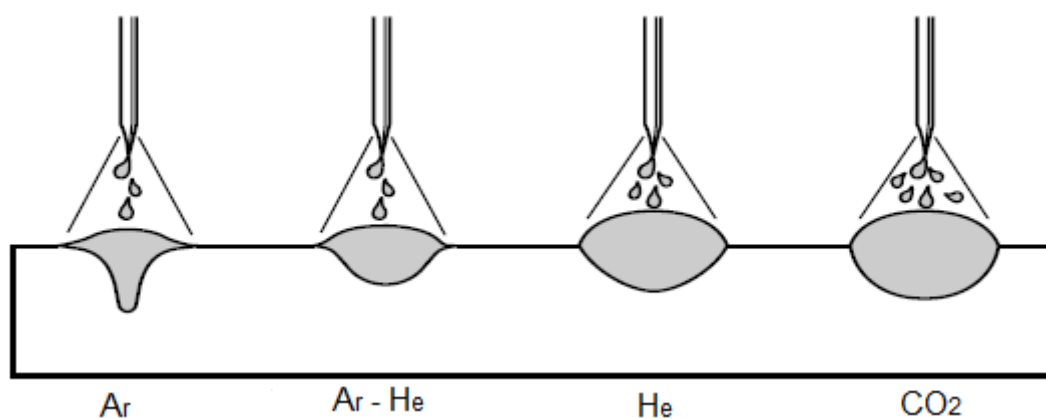
Kao zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja se najčešće koriste mješavine argona (Ar), ugljičnog dioksida (CO₂), kisika (O₂) te helija (He). Ugljični dioksid se može koristiti i kao samostalni plin. Najčešće korišteni plinovi kod MAG postupka zavarivanja grupirani prema normi HRN EN 439 su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Podjela zaštitnih plinova za MAG – zavarivanje po HRN EN 439 i njihova primjena [10]

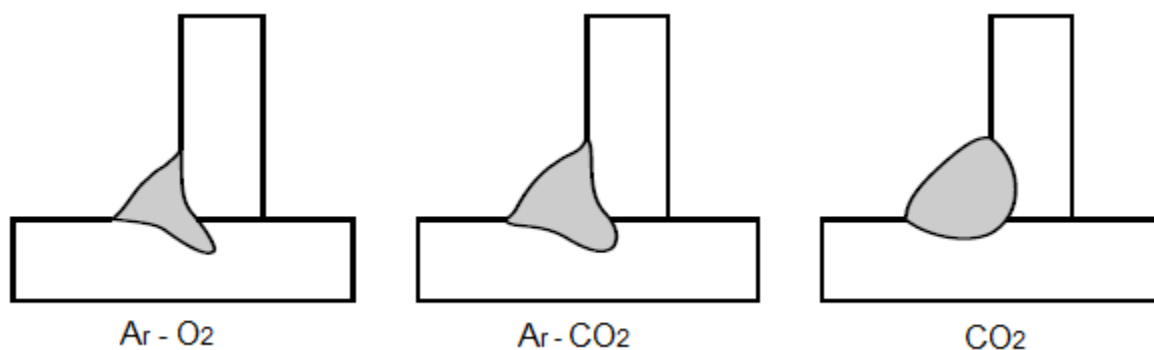
Grupa po HRN EN 439	Oznaka	Komponente vol. [%]				
		CO ₂	O ₂	H ₂	Ar	
M1	1	> 0 do 5	-	> 0 do 5		visokolegirani čelici
	2	> 0 do 5	-	-	ostatak	
	3	-	> 0 do 3	-	ostatak	
	4	> 0 do 5	> 0 do 3	-	ostatak	
M2	1	> 5 do 25	-	-	ostatak	nelegirani čelici
	2	-	> 3 do 10	-	ostatak	
	3	> 0 do 5	> 3 do 10	-	ostatak	
	4	> 5 do 25	> 0 do 8	-	ostatak	
M3	1	> 25 do 50	-	-	ostatak	
	2	-	> 10 do 15	-	ostatak	
	3	> 5 do 50	> 8 do 15	-	ostatak	
C	1	100	-	-	-	

M: mješavina plina, C: ugljični dioksid/CO₂

Kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova dolazi do reakcije između CO_2 i rastaljenog metala pa zbog toga treba obratiti dodatnu pažnju radi pojave oksidacije. CO_2 je inertan pri nižim temperaturama ali se iznad $1600\text{ }^\circ\text{C}$ disocira na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji onda reagira s rastaljenim metalom. Dodavanjem CO_2 argonu dobiva se mješavina koja daje ljepši izgled zavaru, smanjuje rasprskavanje kapljica metala te se dobiva povoljniji oblik protaljivanja. Argon je inertan plin jer ne dolazi do reakcije između njega i rastaljenog metala. Argon štiti korijen zavora od oksidacije, zahtijeva točniju pripremu spoja i vođenje pištolja ali osigurava duboku penetraciju. Helij je također inertan te ne dolazi do reakcija s rastaljenim metalom. Zbog svoje male gustoće od 0.1786 kg/m^3 helij je dobar za zavarivanje u nadglavnom položaju, a inače je potreban veći protok. Slika 8 i slika 9 prikazuju profile zavora koji se dobiju korištenjem različitih zaštitnih plinova i plinskim mješavinama.



Slika 8. Utjecaj zaštitnih plinova na oblik zavora [1]

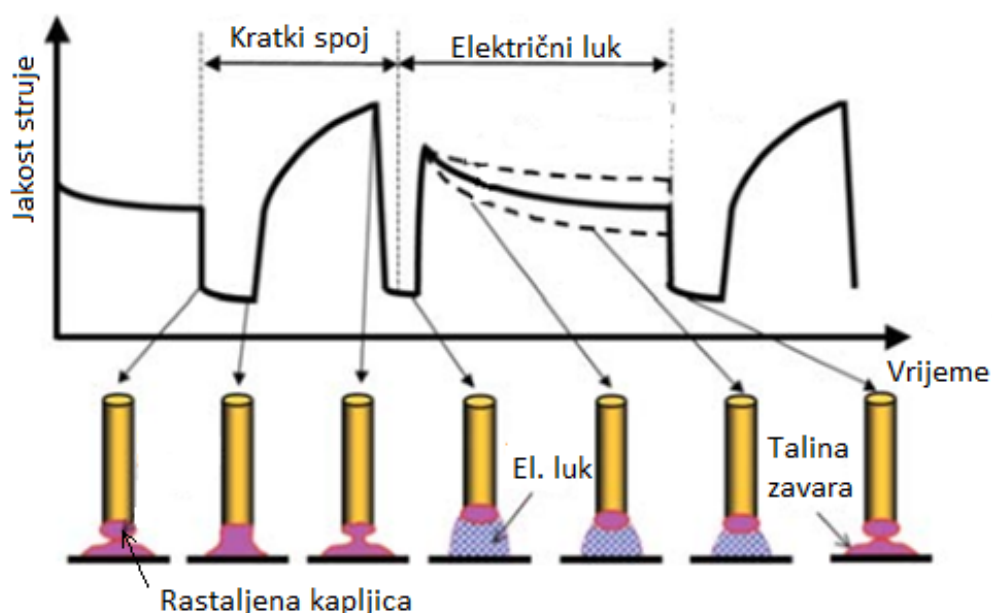


Slika 9. Utjecaj zaštitnih plinova i mješavina na dubinu penetracije [1]

Različiti prijenosi metala zahtijevaju različite plinske mješavine. Kod prijenosa kratkim spojevima koristi se ili 100% CO₂ ili mješavina 75-82% argona i 18-25% CO₂. Pri MAG CBT zavarivanju se koriste isti plinovi ali se teži korištenju 100% CO₂ radi smanjenja troškova. Prijenos štrcajućim lukom zahtijeva mješavinu argona s 1-5% O₂ ili mješavinu argona s maksimalno 18% CO₂. Ista takva mješavina s maksimalno 18% CO₂ koristi se i kod zavarivanja impulsnim strujama. Kod prijelaznog luka koristi se ili 100% CO₂ ili mješavina argona s 50% CO₂. [1]

3. CONTROLLED BRIDGE TRANSFER (CBT)

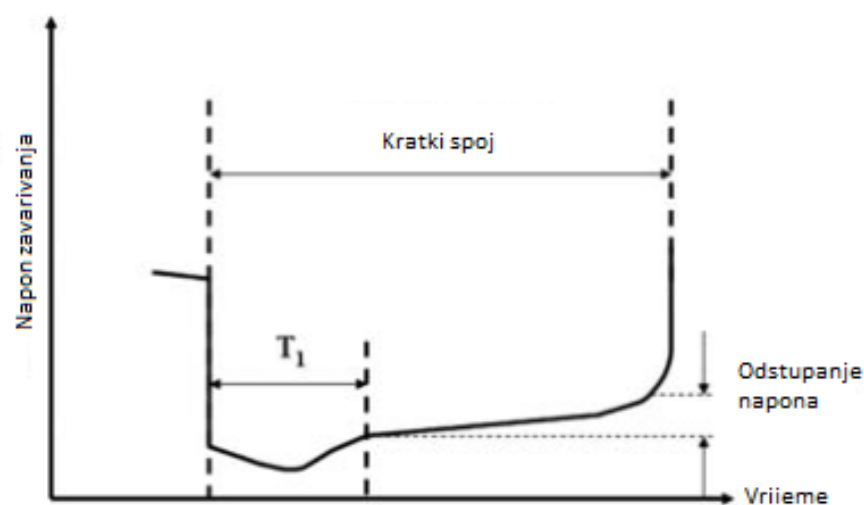
MIG/MAG postupak zavarivanja prikladan je za zavarivanje tankih limova pomoću prijenosa metala kratkim spojevima. Prijenosom metala kratkim spojevima ostvaruje se mala količina rastaljenog metala pa je upravo zbog toga prikladan za zavarivanje tankih limova, korijenskog prolaza i zavarivanje u prisilnim položajima [2]. No, u tom području minimalnog unosa topline tj. kratkom luku MAG postupak je izrazito osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Štrcanje narušava kvalitetu zavarenog spoja i poskupljuje postupak zahtijevajući naknadnu obradu kao na primjer brušenje. Potrebno je naglasiti da automobilska i motociklistička industrija najviše primjenjuju tanke limove te zbog toga kontinuirano zahtijevaju od proizvođača opreme razvoj postupaka u svrhu povećanja produktivnosti i smanjivanja troškova naknadne obrade. Kako bi se problem štrcanja eliminirao (ili smanjio) razvijena je nova metoda prijenosa metala koja minimalizira štrcanje i omogućuje stabilan električni luk uz primjenu različitih zaštitnih plinova. Nova metoda prijenosa metala kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MIG/MAG zavarivanja – CBT, Controlled Bridge Transfer metoda. Princip rada CBT metode je prikazan na slici 8.



Slika 10. Princip rada CBT metode zavarivanja [10]

Pojava štrcanja je najproblematičnija i najčešća pri MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima odmah nakon prekida kratkog spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnog luka. U tom trenutku na rastaljeni metal djeluje sila „magnetskog štipanja“ ili „pinch efekta“ te ako se želi smanjiti štrcanje potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije uspostave električnog luka. Zajedno s padom napona u istom trenutku dolazi do pada vrijednosti jakosti struje (slika 10). Posljedica pada vrijednosti jakosti struje je prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice isključivo pomoću površinske napetosti. Kako bi se nadoknadio gubitak energije zbog smanjenja jakosti struje u kratkom spoju i na taj način postigla odgovarajuća veličina kapljice metala, u trenutku kada je električni luk uspostavljen jakost struje se naglo povećava. Princip rada CBT metode se temelji na preciznom podešavanju jakosti struje optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka [2].

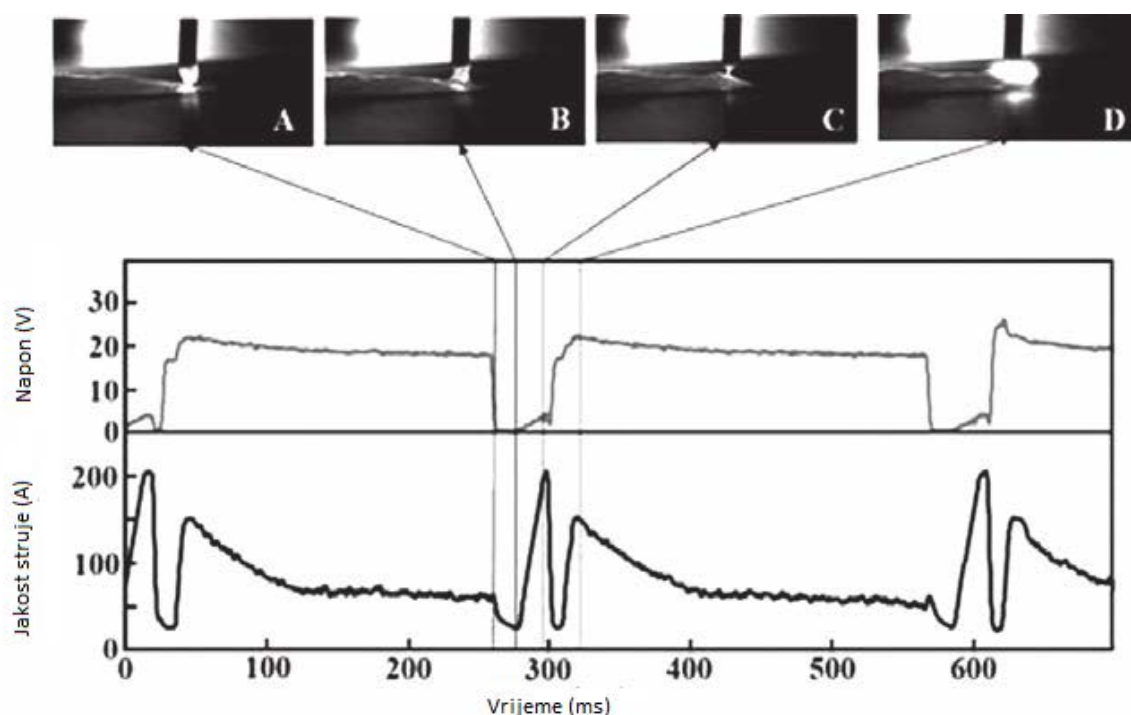
Slika 11 prikazuje princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja. Nakon uspostavljanja kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s vrijednosti jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava štrcanja. Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti je označen sa T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje se odstupanje od referentnog napona mjeri često i precizno te kada odstupanje dosegne određenu graničnu vrijednost dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka. Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80% Ar + 20% CO₂ optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1.2 do 2.0 V. Nužno je predvidjeti točan trenutak ponovnog uspostavljanja električnog luka koji može varirati zbog različitih nepravilnosti (duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline). Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati [11].



Slika 11. Kriterij predviđanja uspostave električnog luka [11]

Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom štrcanja. Zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline rezultira i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije) [2].

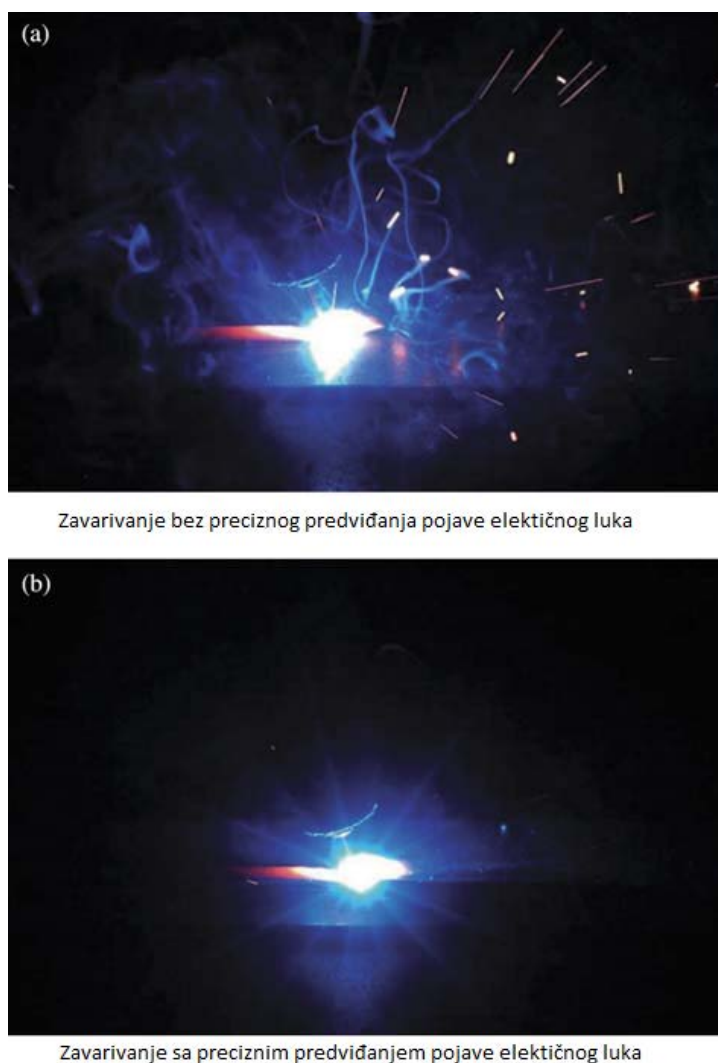
Slika 12 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom. Prijenos rastaljene kapljice je snimljen u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Zavarivanje se izvodilo sa žicom promjera 1.0 mm pri prosječnoj struji zavarivanja od 80 A, prosječnim naponom od 16.2 V te brzinom zavarivanja od 50 cm/min. Korišteni zaštitni plin je bio sastava 80% Ar + 20% CO₂ [12].



Slika 12. CBT prijenos metala u realnom vremenu snimljen visokobrzinskom kamerom [12]

Kadar A na slici 12 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkoga spoja. Prolaskom vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavara te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do štrcanja.

Slika 13 (a) prikazuje slučaj zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja gdje nije bilo preciznog predviđanja pojave električnog luka. Pošto je predviđanje pojave električnog luka bilo namješteno na duljinu slobodnog kraja žice od 5 mm, s povećanjem duljine slobodnog kraja žice sve više su rasle krive detekcije ponovnog uspostavljanja električnog luka, a s time je rasla i veća količina štrcanja. Zbog lažnih detekcija uspostavljanja električnog luka, struja kratkog spoja bila je neadekvatna što je dovelo do neuravnoteženog taljenja žice u kratkom spoju i nestabilnog električnog luka. Slika 13 (b) prikazuje slučaj zavarivanja pomoću CBT metode prijenosa metala. Preciznim predviđanjem pojave električnog luka i kontroliranjem struje zavarivanja smanjilo se štrcanje.

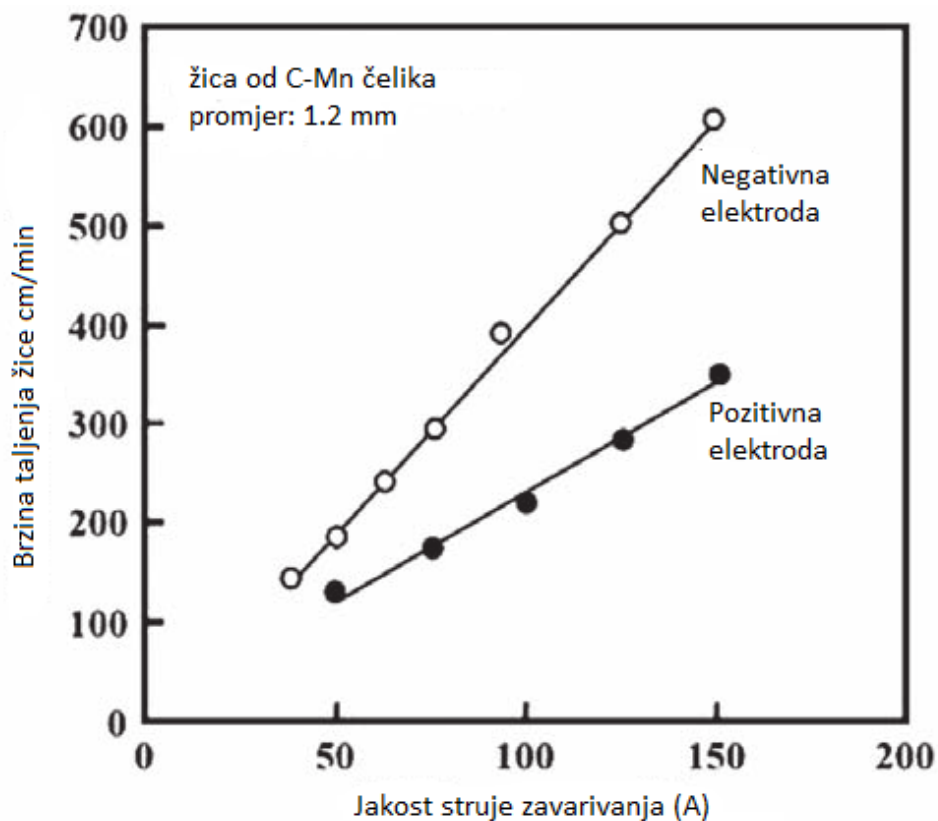


Slika 13. Usporedba zavarivanja konvencionalnim MAG i CBT MAG [12]

3.1. EN-CBT postupak

CBT način prijenosa metala se može koristiti kod zavarivanja sa žicom spojenom na negativni pol (Electrode Negative; u daljnjem tekstu EN-CBT) što omogućuje mali unos topline i smanjeno štrcanje. Pri EN-CBT postupku količina topline u žici je veća nego u osnovnom metalu. Zbog toga je brzina taljenja žice (depozit) pri EN-CBT veća nego kod CBT postupka sa žicom spojenom na pozitivan pol. Na slici 14 se može vidjeti usporedba brzine taljenja žice promjera 1,2 mm kada je spojena na pozitivan pol i kada je spojena na negativan pol u zaštitnoj atmosferi 100 % CO_2 . Kod zavarivanja s EN-CBT postupkom vrijednost struje

zavarivanja je $\frac{2}{3}$ vrijednosti struje kod zavarivanja s pozitivnom elektrodom pri jednakoj količini depozita. Ili drugim riječima, EN-CBT omogućuje manji unos topline pri jednakom količinom depozita nego kod zavarivanja s elektrodom spojenom na pozitivan pol [12].



Slika 14. Usporedba brzine taljenja žice pri pozitivnom polu i negativnom polu [12]

3.2. AC – CBT postupak

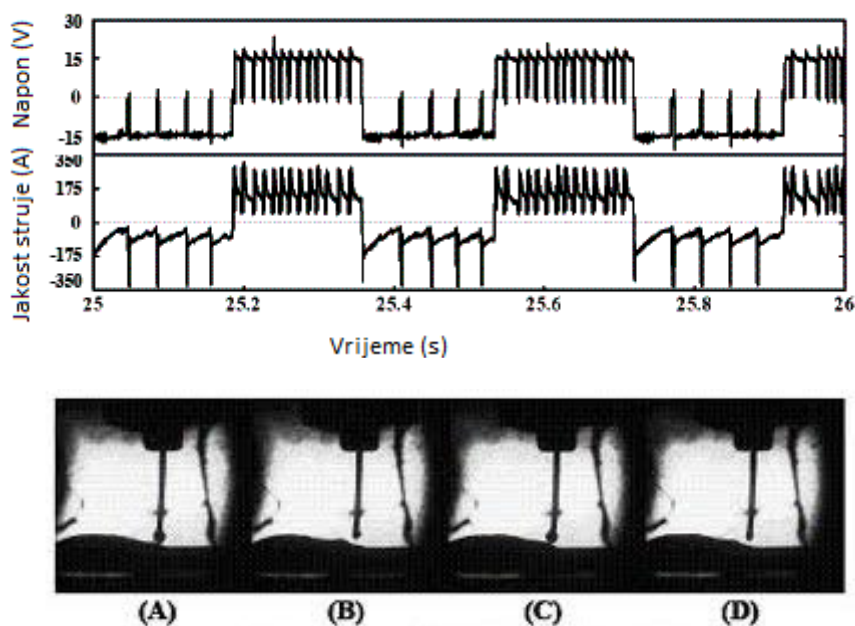
AC – CBT (Alternative Current – CBT) postupak je inačica klasičnog CBT postupka gdje se koristi izmjenična struja s malom frekvencijom izmjene pozitivnog i negativnog pola. Vrijeme trajanja negativnog i pozitivnog pola se mjeri pomoću frekvencije i omjera negativnog i pozitivnog pola. Iako je brzina taljenja žice za vrijeme negativnog polariteta otprilike 1,5 puta veća, može se postići stabilan prijenos metala za vrijeme oba polariteta. Ta stabilnost se prvenstveno postiže pomoću novo razvijenih uređaja i mikroprocesora koji omogućuju preciznu kontrolu karakteristika električnog luka (jakost struje, napon) za vrijeme oba polariteta [13].

Slika 15 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni metal pri AC-CBT načinu prijenosa metala snimljen visokobrzinskom kamerom s mogućnošću snimanja 6000 slika u sekundi. Prijenos rastaljene kapljice je snimljen u korelaciji s promjenom vrijednosti jakosti struje i napona zavarivanja. Parametri korišteni pri zavarivanju su navedeni u tablici 2.

Tablica 2. Parametri zavarivanja AC-CBT metodom prijenosa metala [13]

Zaštitni plin	80% Ar + 20% CO₂
Jakost struje, A	100
Napon, V	15,0
Promjer žice, mm (YGW12)	1,2
Brzina zavarivanja, cm/min	50
Frekvencija, Hz	3,0
Omjer + i – pola, %	50

Kadar A na slici 15 prikazuje trenutak prijenosa metala u vrijeme mjerenja ekvivalentan trenutku mjerenja jakosti struje i napona od 25 sekundi. U tom trenutku električni luk je u drugoj polovici pri negativnim polaritetom. Kadar B prikazuje rastaljenu kapljicu u trenutku ponovnog uspostavljanja električnog luka nakon prolaska kratkog spoja. Kadar C prikazuje trenutak od 25,2 sekunde neposredno prije prelaska polariteta iz negativnog u pozitivan. Vidljivo je da rastaljena kapljica ima gotovo identičan oblik i veličinu kao u kadru A. Na kadru C se vidi da je štrcanje spriječeno i kod ponovne uspostave električnog luka neposredno nakon promjene polariteta [13].

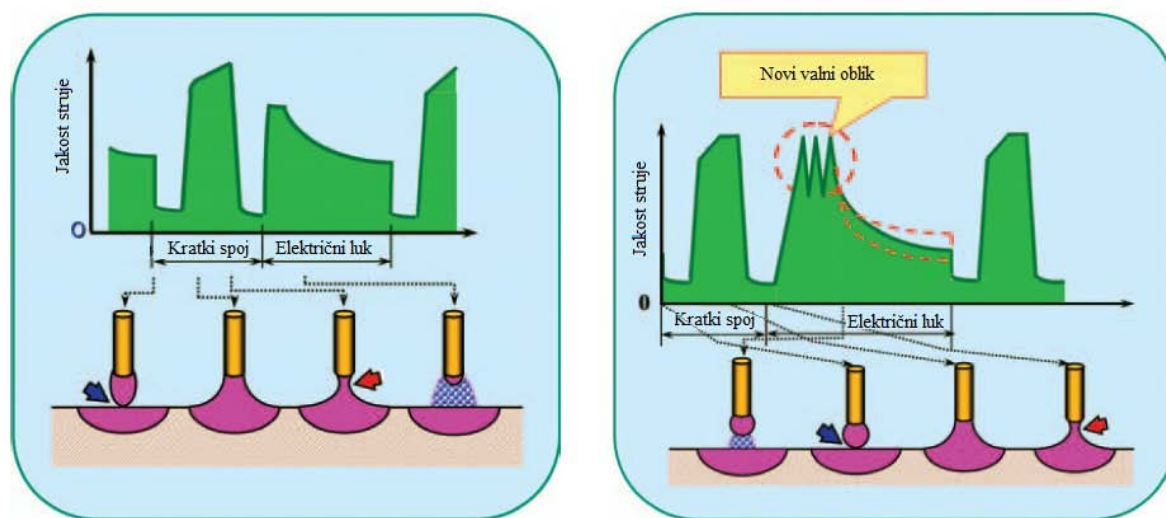


Slika 15. Prijenos metala kod AC-CBT postupka u realnom vremenu [13]

Prednost ovog postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno je i jednostavno kontroliranje oblika zavar. Isto tako se smanjila pojava štrcanja do 6 puta s obzirom na klasični AC – MAG [13].

3.3. CBT-EX postupak

Razvijanjem CBT postupka zavarivanja moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u područjima manjih struja i napona tj. u rasponu parametara rada koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. U želji da se poveća proizvodnost procesa i brzina zavarivanja uz visoku kvalitetu zavarenog spoja potrebno je bilo nadograditi klasični CBT postupak. Tako se razvila nova inačica: Controlled Bridge Transfer – Expanded, CBT – EX. Slika 16 prikazuje princip rada CBT – EX procesa. Pojačavanjem vrijednosti parametara zavarivanja dolazi do krupnokapljičastog (globularnog) prijenosa metala te kako bi se predvidjela ponovna uspostava električnog luka pri takvom prijenosu bilo je potrebno razviti novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor. Osim predviđanja uspostave električnog luka pomoću ovog mikroprocesora moguće je formirati rastaljenu kapljicu metala odgovarajućih dimenzija i oblika na samom vrhu elektrode i to pomoću fine regulacije duljine električnog luka [14].



a) Općeniti valni oblik struje za MIG/MAG zavarivanje

b) Valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO₂ zaštiti

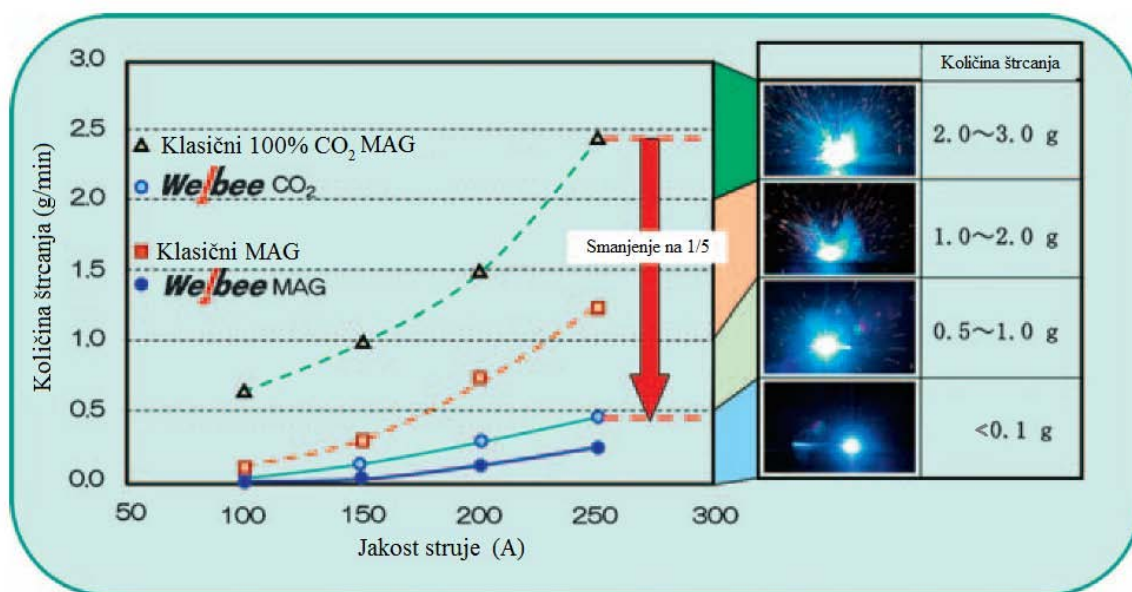
Slika 16. Princip CBT-EX tehnologije MIG/MAG zavarivanja [14]

Na slici 16.a prikazan je općeniti valni oblik struje za MIG/MAG zavarivanje. Vidljivo je da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učina taljenja dodatnog materijala s obzirom na to da je kod krupnokapljica prijenosa metala brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Nakon toga, jakost struje koja se mijenja u realnom vremenu ovisno o metodi prijenosa metala i ponašanju taline, regulira duljinu električnog luka. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja pa se stoga može primjenjivati kod zavarivanja korijena sučeljenog spoja cijevi [2].

Na slici 16.b je prikazan valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO₂ zaštiti. Uzrok štrcanju pri krupnokapljica prijenosu metala su eksplozije plina u talini i/ili rastaljenoj kapljici zbog pregrijavanja visokom strujom zavarivanja. Zbog karakteristične primjene CBT-EX tehnologije zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk. Kratki električni luk može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva što dovodi do hlađenja metala zavara. Štrcanje pored navedenih pojava može uzrokovati i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO₂) na ugljični

monoksid (CO) i kisik (O_2). Da bi se spriječilo i izbjeglo djelovanje odbojne sile na kapljicu izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka (Slika 16.b). Na takav način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljčasti prijenos metala.

Slika 17 prikazuje usporedne rezultate pojave štrcanja za klasični MAG postupak i za CBT – EX MAG postupak zavarivanja. Pri mjerenju štrcanja varirana je jakost struje u rasponu od 100A do 250A. Brzina zavarivanja je iznosila 100 cm/min dok je korišten dodatni materijal promjera 1,2 mm. Najveća razlika u količini štrcanja je primjećena pri korištenju 100% CO_2 . Pri korištenju Welbee CBT – EX tehnologije dobiveno je smanjenje štrcanja na 20% nego kod klasičnog MAG zavarivanja tj. izmjereno štrcanje kod Welbee CBT – EX tehnologije iznosi 0,5 g/min dok kod klasičnog MAG postupka iznosi 2,5 g/min.







Slika 17. Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT – EX i klasičnom MAG zavarivanju [14]

3.4. Izvor struje za CBT postupak zavarivanja

U novije vrijeme sve više se koriste inverterski ispravljači koji su znatno lakši i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Inverteri daju istosmjernu ili visokofrekventnu pulsirajuću struju. U inverterskom krugu se istosmjerna struja pretvara u izmjeničnu ali se ujedno znatno povećava njena frekvencija (sa 50 Hz na 5-50 kHz). Ova struja se zatim svodi na potrebni napon i jačinu pomoću transformatora koji je znatno manji od klasičnog jer radi na principu visoke frekvencije. Dodatna prednost invertera je njihova povećana efikasnost jer su gubici u željeznoj jezgri transformatora manji u odnosu na konvencionalne transformatore pa je stupanj iskorištenja invertera veći od svih ostalih izvora zavarivanja [15].

U tablici 3 klasificirane su četiri generacije digitalnih invertera te su prikazane njihove osnovne karakteristike. Prva generacija koja je razvijena 1996. godine koristila je 16-bitni procesor s vremenom procesuiranja od 100 μ s. Radi usporedbe s ostalim generacijama kapacitet procesora prve generacije je etiketiran sa 1. Druga generacija invertera je razvijena između 2001. i 2007. godine. Oni su koristili 32-bitni procesor s vremenom procesuiranja od 25 μ s i kapacitetom povećanim četiri puta. Treća generacija, koja je poveznica do četvrte generacije, razvijena je 2008. godine i koristila je FPGA (Field Programmable Gate Array) procesore. FPGA je vrsta digitalnih integriranih sklopova namijenjenih konfiguraciji metodom programiranja od strane korisnika. FPGA integrirani elektronički sklop sastavljen je od matrice memorijskih tablica, bistabila i multipleksora. Naprednije serije FPGA sadrže i množila, memorijske blokove i periferiju za brzu komunikaciju. Navedeni elementi su grupirani u blokove i uronjeni u programabilnu spojnu matricu. Treća generacija ima vrijeme procesuiranja manje od 1 μ s i kapacitet procesora etiketiran sa 16. Novi, razvijeni visokobrzinski i visokorazvijeni Welbee mikroprocesor pripada zadnjoj, četvrtoj generaciji invertera, a razvijen je 2010 godine. Brzina procesuiranja kod Welbee mikroprocesora je oko 20 ns i kapacitet procesora je povećan na 64 puta [14]. Velika brzina procesuiranja tj. obrade omogućuje Welbee mikroprocesoru visokobrzinsku i visokopreciznu kontrolu dinamičke karakteristike jakosti struje i napona izvora struje.

Tablica 3. Generacije invertera za izvor zavarivanja [14]

	Prva generacija 1996-2000	Druga generacija 2001-	Treća generacija 2008-	Četvrta generacija 2010-
Eksterijer				
Procesor	16- bit CPU	32- bit CPU	FPGA	ASIC
Vrijeme procesuiranja (obrade)	100 μs	25 μs	1μs	20 ns
Kapacitet procesora	1	4	16	64

Slika 19 prikazuje novo razvijeni digitalni inverter četvrte generacije koji omogućuje visokobrzinsku i visokopreciznu kontrolu pomoću Welbee mikroprocesora (eng. WELding Best Electronic Engine). Inverter je jako fleksibilan te se može jednostavno spojiti s robotskim rukama novijih generacija (FD serije – Dahein) preko integriranih I/F kartica. Prednosti Welbee mikroprocesora i neke posebne karakteristike invertera su [14]:

- Ugrađeno je zavarivanje MAG nepulsirajućim lukom uključujući CBT-EX postupak i MAG/MIG zavarivanje pulzirajućim lukom;
- Poboljšane karakteristike održavanja i izdržljivosti (slika 18 prikazuje protok zraka dok su elektroničke komponente potpuno izolirane od prašine i nečistoća);
- Prošireno područje primjene uređaja za zavarivanje zbog primjene IT tehnologija;
- Mogućnost stvaranja preko 100 baza parametara zavarivanja;
- Ekološki prihvatljivi uređaji.



Slika 18. Protok zraka kroz Welbee izvor struje [16]

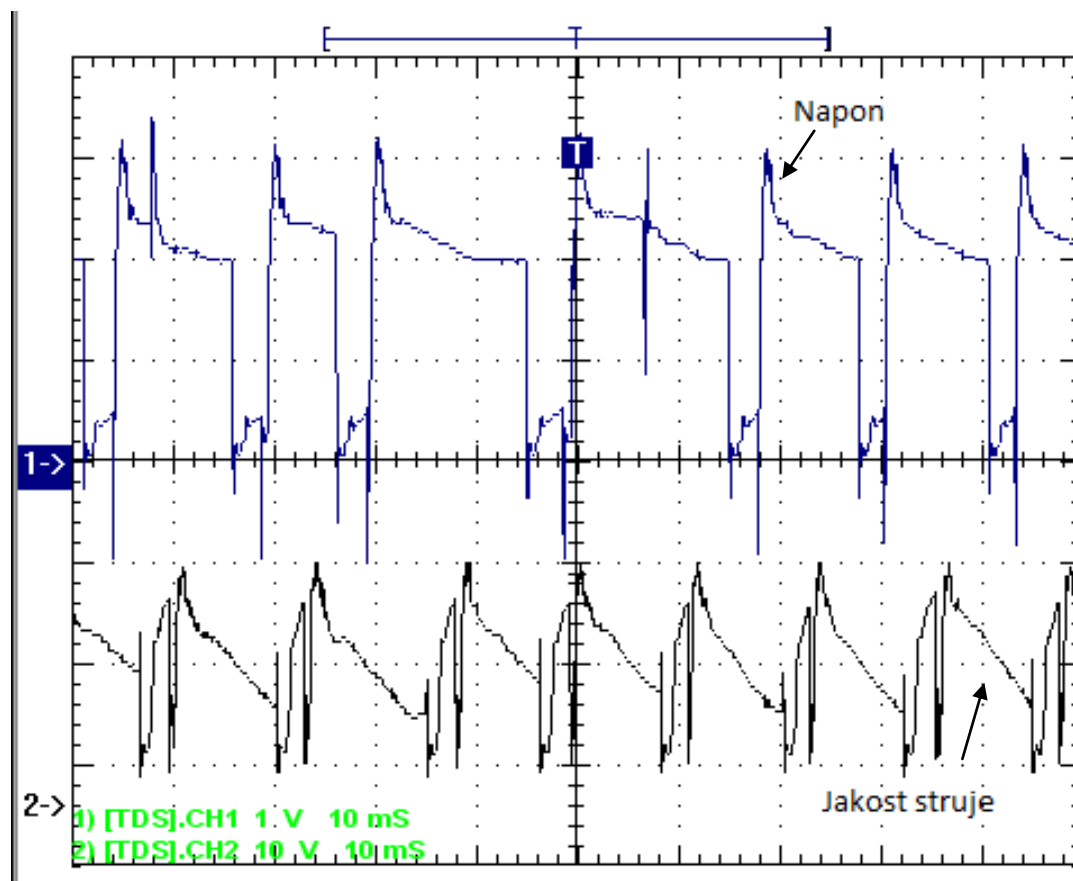


Slika 19. Welbee digitalni inverter P500L s robotskom rukom [14]

Glavna karakteristika nepulsirajućeg procesa zavarivanja ostvarenog pomoću Welbee procesora je mogućnost odabira jedne od četiri kategorije dinamičke karakteristike struje. Svaka kategorija je predviđena za određenu primjenu te korisnik odabire kategoriju koja mu najbolje odgovara.

3.5. Snimanje dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$ pri MAG CBT navarivanju

Dinamička karakteristika prikazuje promjenu napona i struje kod određenog praktičnog zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja do 10 ili više kHz, pri čemu se koriste različiti 'monitoring sistemi', odnosno sistemi za mjerenje, registraciju i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i struje) [18]. Dinamičkim praćenjem parametara zavarivanja pruža se mogućnost ocjene stabilnosti procesa i upravljanja parametrima zavarivanja. Zbog zahtjeva kvalitete zavarenog spoja potrebno je odrediti odgovarajuće parametre. Pošto ne postoji jedinstveni način za opisati dinamičku karakteristiku nekog uređaja za zavarivanje, potrebno ju je mjeriti tijekom zavarivanja. Na slici 20 je prikazana dinamička karakteristika napona koji je označen plavom bojom i struje koja je označena crnom bojom.



Slika 20. Dinamička karakteristika (prikaz napona i struje) za MAG CBT postupak zavarivanja

Dinamička karakteristika uređaja za zavarivanje je određena mjerenjem veoma kratkih (0,001s) prijelaznih varijacija u naponu i jakosti struje koje se pojavljuju u električnom luku [1]. Prijelazni efekti kod elektrolučnog zavarivanja proizlaze iz nekoliko izvora:

- Tijekom uspostave električnog luka,
- Tijekom naglih promjena u duljini električnog luka,
- Tijekom prijenosa metala od vrha elektrode do taline zavara.

Izvor struje se na sljedeće načine „nosi“ s prijelaznim efektima [19]:

- Pohranom energije u paralelne kondenzatore ili u serijski smještene DC induktore;
- Pomoću povratne veze i automatske regulacije;
- Modificiranjem oblika signala i promjenom frekvencije.

Dinamičku karakteristiku nekog izvora struje za zavarivanje moguće je snimiti osciloskopom. Osciloskop je univerzalni instrument za mjerenje napona, struje i otpora, te je najčešće korišteni mjerni instrument u elektronici. Osnovna namjena mu je prikazivanje vremenskih oblika periodičkih naponskih signala. Posljednjih godina došlo je do unapređenja mogućnosti digitalnih osciloskopa, tako da današnji digitalni osciloskopi imaju opcije vrlo slične opcijama analognog osciloskopa, a pružaju i dodatne pogodnosti u vidu lakog prijenosa rezultata mjerenja na računalo, njihove daljne digitalne obrade, kao i niza automatiziranih mjerenja na promatranom vremenskom dijagramu. Zbog što boljeg praćenja, daljnje obrade i analize rezultata izmjerenih osciloskopom, potrebno je na računalo imati odgovarajući softver za detekciju mjernih signala, poput na primjer programske aplikacije Wavestar.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

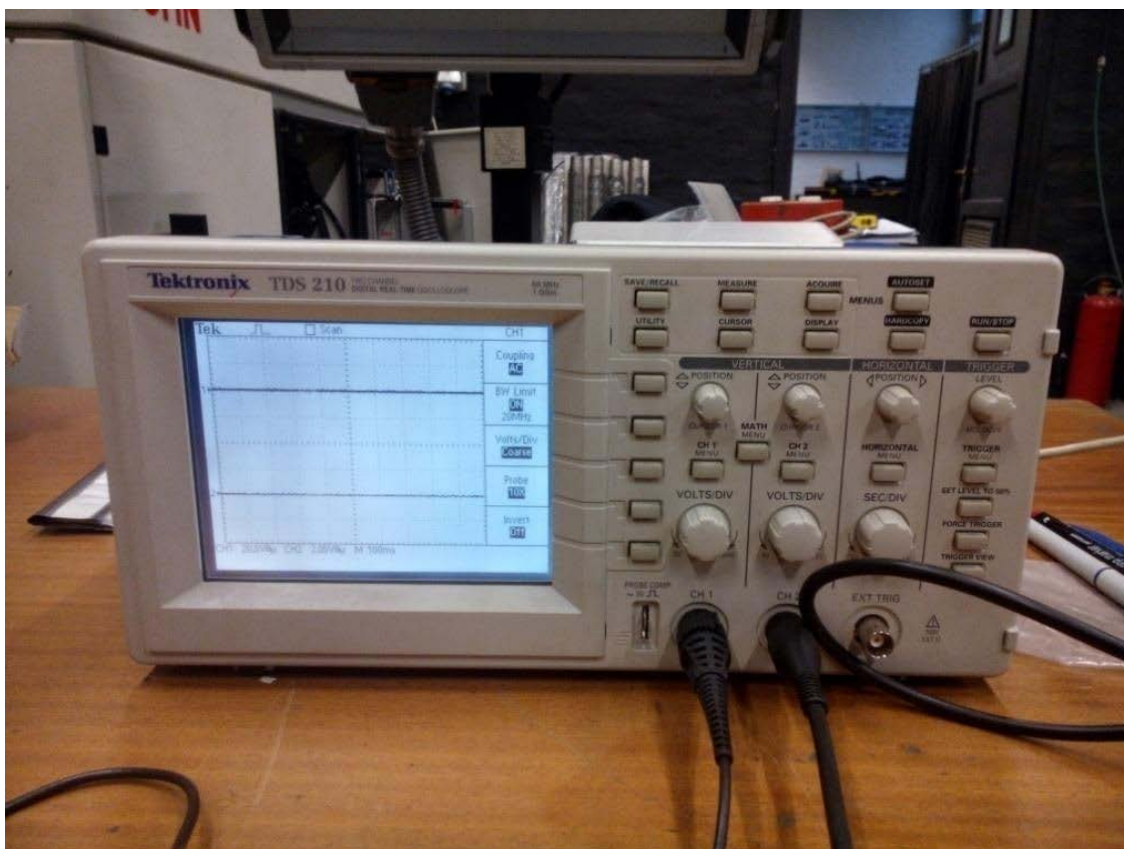
Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. U eksperimentalnom radu analizirane su dinamičke karakteristike izvora struje za zavarivanje pri prijenosu metala kratkim spojevima (klasično) i pri „Low spatter“ – CBT načinu prijenosa metala. Korišteni izvor struje za zavarivanje je OTC Daihen Welbee P500L. Prijenos metala izveo se navarivanjem u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ te potom u zaštitnoj atmosferi mješavine Ar 82% / CO₂ 18%. Na temelju snimljenih dinamičkih karakteristika analizirane su osnovne značajke faze kratkog spoja i električnog luka ovisno o vrsti plina i jakosti struje zavarivanja. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja jakost struje zavarivanja se može namještati direktno i indirektno, preko brzine dodavanja žice i odabira njenog promjera na izvoru struje za zavarivanje.

Slika 21 prikazuje radno mjesto gdje je izveden eksperimentalni rad. Na slici je vidljiv izvor struje, osciloskop, pomoću kojeg se mjerila dinamička karakteristika te računalo na kojem su analizirani i obrađeni podaci dobiveni osciloskopom. Podaci dobiveni osciloskopom su prikazani i obrađeni pomoću programske aplikacije Wavestar.



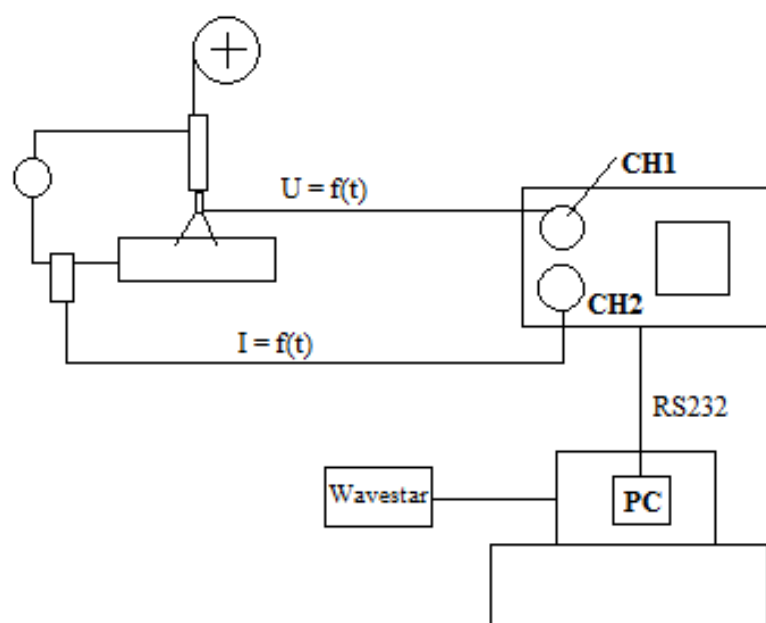
Slika 21. Radno mjesto u Laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb

Slika 22 prikazuje osciloskop kojim su snimane dinamičke karakteristike napona i struje u eksperimentalnom dijelu rada. Radi se o dvokanalnom Tektronix TDS 210 osciloskopu. Ovaj osciloskop nudi veliko frekvencijsko područje, automatizaciju mjernih značajki i jednostavnost korištenja. Dva ulazna kanala su kontrolirana svaki zasebno pomoću potenciometara i prekidača.



Slika 22. Osciloskop Tetronix TDS 210 [2]

Slika 23 prikazuje shemu spajanja osciloskopa, izvora struje s računalom na kojem se nalazi programski paket Wavestar. S obzirom da je riječ o vrlo naprednoj tehnologiji koja zahtijeva visoku frekvenciju prikupljanja podataka sa što manjim odstupanjima, tijekom rada je potrebno imati spojenu posebnu povratnu vezu putem kabela koji se spaja sa izvorom struje i masom radnog komada. Na slici 24 je prikazan kabel povratne veze koji je potreban kod „Low Spatter“ načina rada.



Slika 23. Shema spajanja mjerne opreme [20]



Slika 24. Kabel za povratnu vezu potreban kod „Low spatter“ načina rada [2]

4.1. Izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L

Izvor struje za zavarivanje je Welbee P500L (WB – P500L) kojeg je razvila i proizvela tvrtka OTC Daihen. To je najnovija generacija izvora struje za MAG zavarivanje i prvi uređaj u industriji koji koristi nanotehnološki Welbee procesor za kontrolu elektrolučnog zavarivanja. Model P500L je najbolji model od Welbee serije koji pruža mogućnost optimalnog zavarivanja običnog tj. konstrukcijskog čelika, nehrđajućeg čelika i aluminija.

Model WB – P500L ima 8 različitih načina rada [16]:

- Pulse MAG,
- Pulse MIG,
- Low-spatter CO₂/MAG,
- Low-spatter SUS-MIG,
- CO₂,
- MAG,
- AL-MIG,
- SUS-MIG.

Slika 25 prikazuje sučelje za podešavanje načina rada i parametre zavarivanja na izvoru struje zavarivanja OTC Daihen Welbee P500L.



Slika 25. Sučelje za podešavanje načina rada i parametre zavarivanja - OTC Daihen Welbee P500L



Slika 26. Izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L

Slika 26 prikazuje izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Welbee P500L smješten u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu dok su u tablici 4 dani tehnički podaci izvora struje.

Tablica 4. Tehnički podaci izvora struje za zavarivanje [15]

WB – P500L		
	DC	Pulse
Priključni napon	400 +/- 15% V	
Broj faza	3	
Nazivna ulazna snaga	25 kVA	
Intermitencija	60 %	80%
Struja zavarivanja	30 – 500 A	30 – 400 A
Napon zavarivanja	12 – 39 V	12 – 34 V
Težina	83 kg	
Dimenzije (ŠxDxV)	395x710x592 mm	

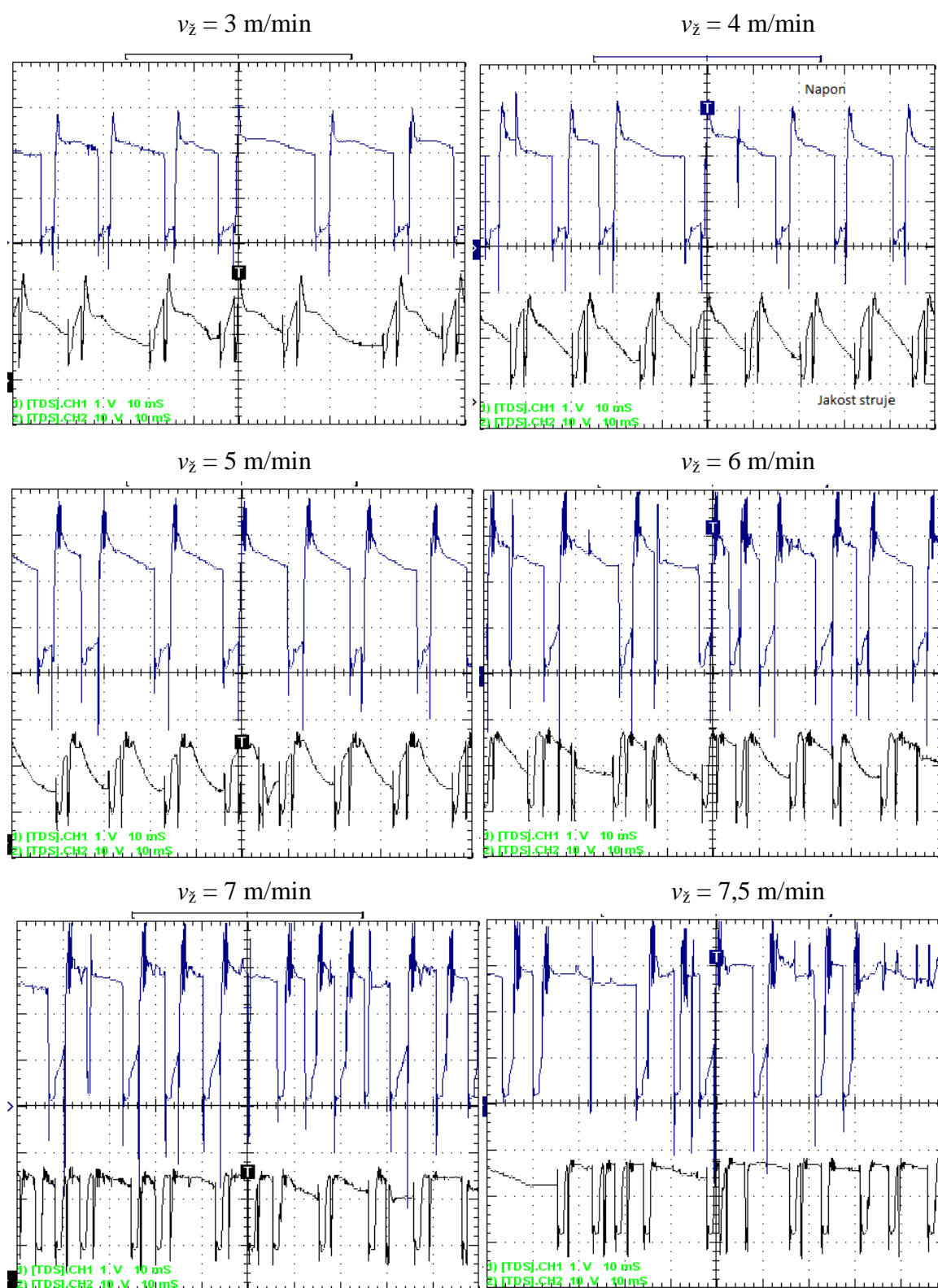
4.2. Snimanje dinamičke karakteristike pri navarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂

Prvo navarivanje i snimanje dinamičke karakteristike obavljeno je u zaštitnoj atmosferi mješavine 82 % Ar / 18 % CO₂. Navarivanje se prvotno vršilo modificiranim CBT načinom prijenosa metala, a nakon toga klasičnim načinom. U tablici 5 prikazani su korišteni parametri navarivanja. Brzina navarivanja držala se konstantnom dok je jakost struje varirala, tako što se podešavala brzina dodavanja žice (v_z) u rasponu od 3 m/min do 7,5 m/min. Pri brzini dodavanja žice od 7,5 m/min brzina navarivanja je povećana na 35 cm/min.

Tablica 5. Parametri navarivanja u zaštitnoj atmosferi 82 %Ar / 18 %CO₂

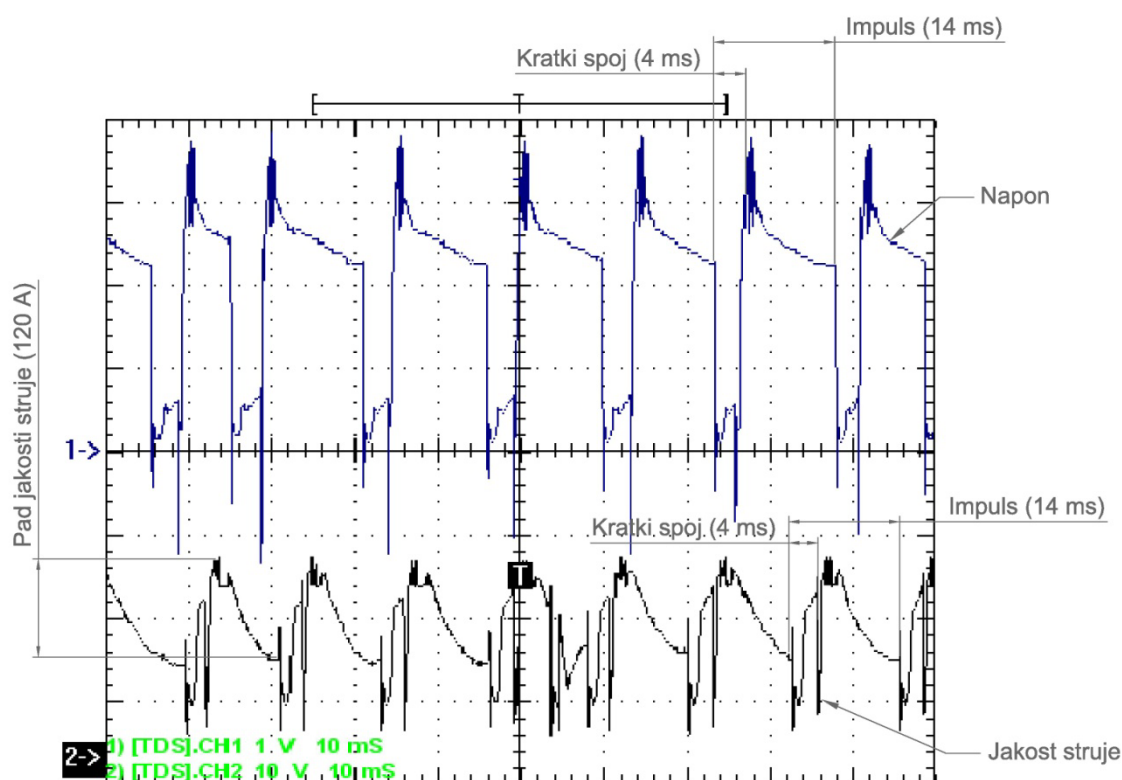
Udio CO ₂ , %	Brzina dodavanja žice, m/min	Očitana jakost struje, A	Očitani napon rada, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Način prijenosa metala, CBT/Klasično
18	3	125	18,1	25	CBT
18	4	151	18,5	25	CBT
18	5	170	19,5	25	CBT
18	6	195	20,2	25	CBT
18	7	215	21,5	25	CBT
18	7,5	225	22,4	35	CBT
18	3	133	18,6	25	Klasično
18	4	160	19,1	25	Klasično
18	5	180	19,9	25	Klasično
18	6	200	20,9	25	Klasično
18	7	225	23	25	Klasično
18	7,5	235	23,7	35	Klasično

Slika 27 prikazuje snimljene oscilogramе dinamičkih karakteristika jakosti struje i napona pri brzinama dodavanja žice navedenim u tablici 5 za modificirani CBT način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂.



Slika 27. Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala (82% Ar / 18% CO₂)

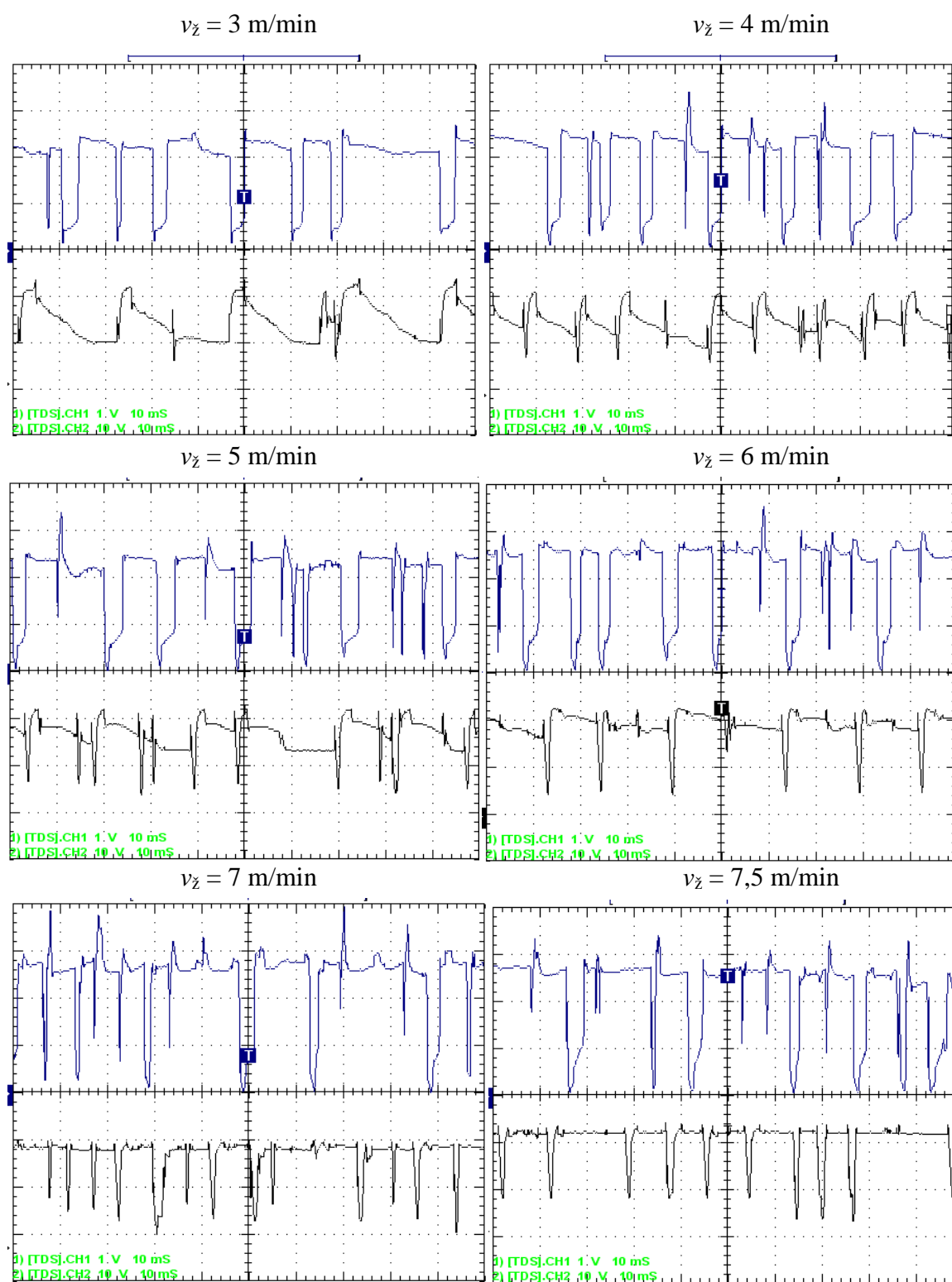
Na slici 28 prikazan je oscilogram dinamičke karakteristike struje i napona pri brzini dodavanja žice od 5 m/min. Koristio se „Low spatter“ – CBT modificirani način prijenosa metala. Tada je očitana jakost struje od 170 A i napon rada od 19,5 V. Može se vidjeti da su impulsi vrlo stabilni i razmaci između njih pravilni. Na slici su označene duljine (vrijeme) trajanja cijelog impulsa i vrijeme trajanja perioda dok je žica u kontaktu s talinom tj. u kratkom spoju. Isto tako je označen pad jakosti struje na nominalnu vrijednost za vrijeme perioda električnog luka.



Slika 28. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO₂)

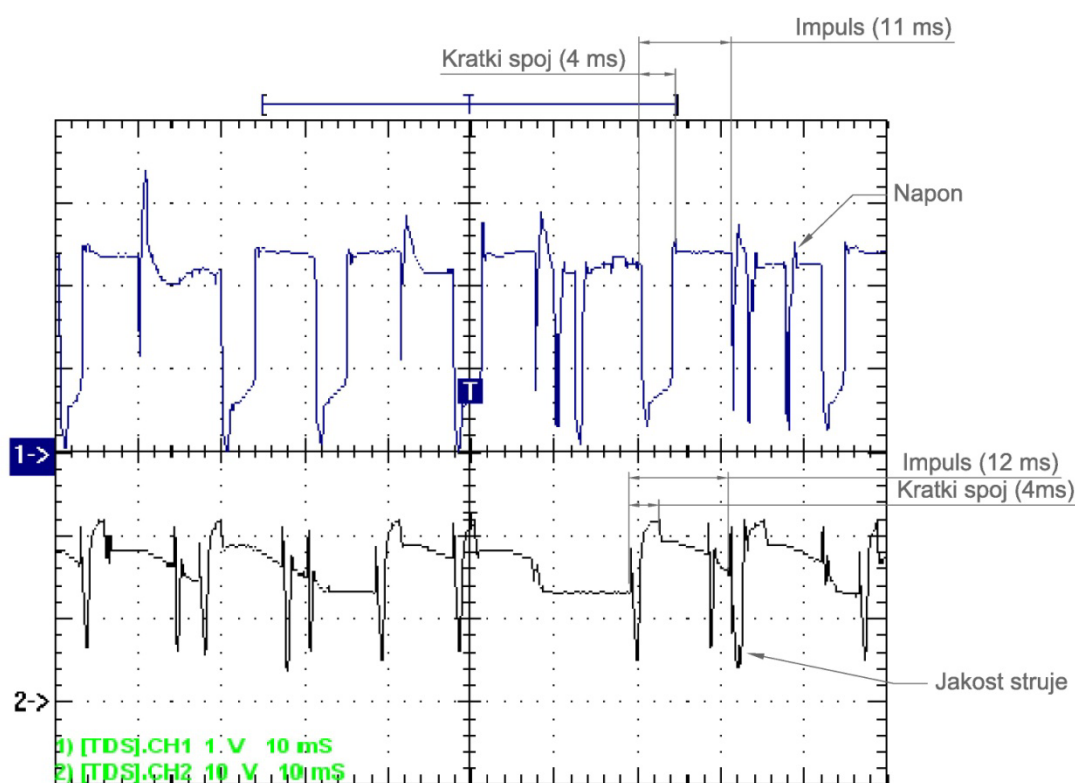
Da bi se analizirala vremena trajanja impulsa i kratkog spoja bilo je potrebno izmjeriti vrijeme trajanja impulsa i kratkih spojeva na način koji je prikazan na slici 28. U radu su prikazani i analizirani rezultati mjerenja dinamičke karakteristike jakosti struje. Izmjereni i izračunati podaci dani su u tablici 6.

Slika 29 prikazuje snimljene oscilogramе dinamičkih karakteristika struje i napona pri brzinama dodavanja žice navedenim u tablici 5 za klasični način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂.



Slika 29. Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri klasičnom načinu prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO₂)

Slika 30 prikazuje dinamičke karakteristike struje i napona pri brzini dodavanja žice od 5 m/min pri klasičnom načinu prijenosa metala. Jakost struje iznosila je 180 A dok je očitani napon rada iznosio 19,9 V. Označena je duljina trajanja impulsa i kratkih spojeva za karakteristiku struje i napona. Na oscilogramu je vidljivo da se prijenos kratkim spojevima pri ovoj brzini žice počeo kombinirati sa štrcajućim lukom. Trajanje impulsa i njihovi razmaci su dosta nepravilni. Zbog toga bi se ovakav način prijenosa metala mogao svrstati u prijenos metala prijelaznim lukom što pri manjim brzinama dodavanja žice nije bio slučaj.



Slika 30. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO₂)

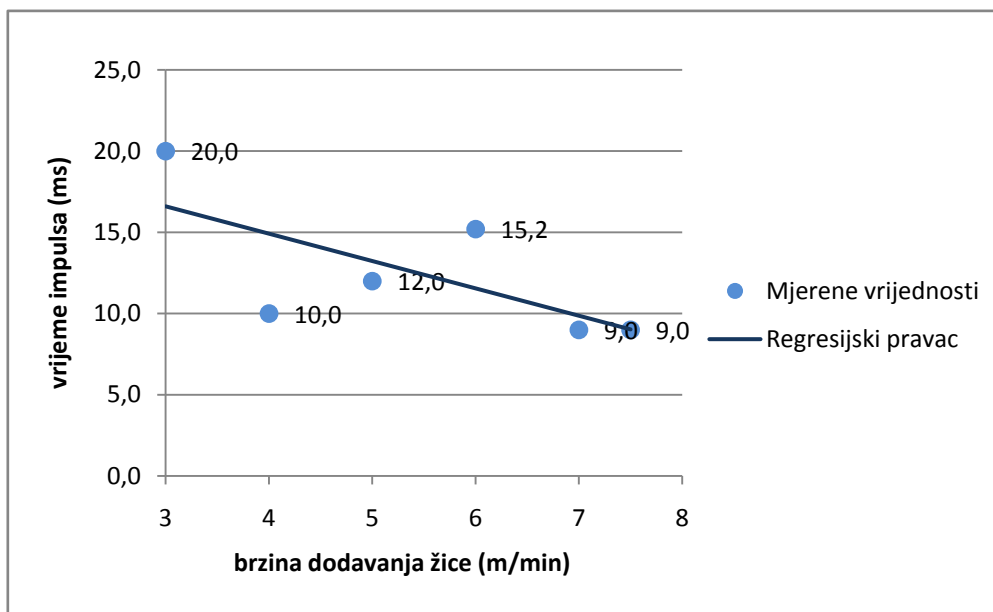
U tablici 6 su prikazane izmjerene vrijednosti duljine (vremena) trajanja cijelog impulsa i trajanja kratkih spojeva za CBT način prijenosa metala te za klasični način prijenosa metala. Izmjerene vrijednosti mjerene su na odabranim (snimljenim) impulsima za svaku brzinu dodavanja žice. Pri brzinama dodavanja žice od 7 m/min, a posebno 7,5 m/min stabilnost kontroliranja struje pri CBT načinu prijenosa se gubila. Pošto je karakteristika struje izgubila stabilnost moguće je da izmjerene vrijednosti trajanja impulsa imaju nešto veće odstupanje od prosječnih. Isto tako vrijedi i za klasični način prijenosa metala kada prijenos metala kratkim spojevima pri većim brzinama prelazi u prijelazni luk.

Tablica 6. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod klasičnog i CBT načina prijenosa metala za mješavinu 82 % Ar / 18 % CO₂

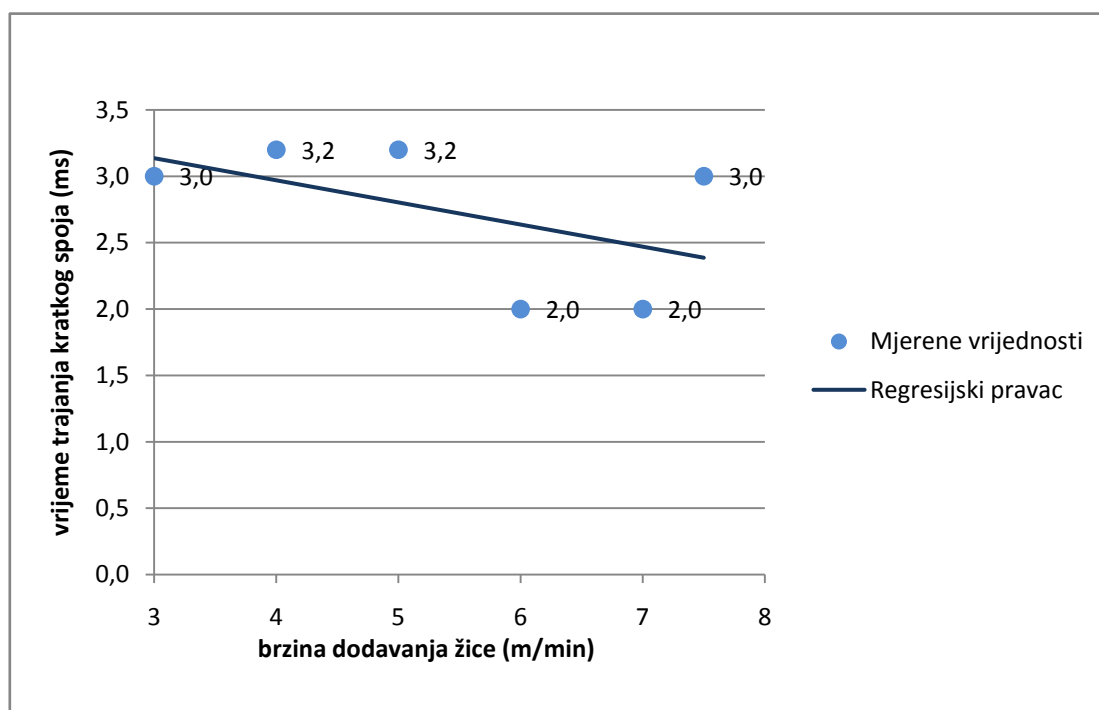
Brzina dodavanja žice (m/min)	Prijenos klasičnim načinom		Prijenos CBT načinom	
	vrijeme cijelog impulsa (ms)	vrijeme trajanja kratkog spoja (ms)	vrijeme cijelog impulsa (ms)	vrijeme trajanja kratkog spoja (ms)
3	20,0	3,0	15,6	4,0
4	10,0	3,2	12,0	3,6
5	8,8	3,2	14,0	3,6
6	15,2	2,0	7,6	3,6
7	9,0	2,0	6,8	3,2
7,5	9,0	3,0	8,0	3,0

Slika 31 prikazuje promjenu vremena trajanja cijelog impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala. Regresijski pravac dobiven je prema podacima iz tablice 6. Pomoću regresijskog pravca je vidljivo da vrijeme trajanja impulsa pada kako brzina dodavanja žice raste. Vrijeme trajanja impulsa pada jer zbog veće brzine dodavanja žice veća je i jakost struje zavarivanja pa samim time dolazi do veće oslobođene topline, bržeg taljenja dodatnog materijala i veće količine depozita.

Na slici 32 je prikazana promjena vremena kratkih spojeva u ovisnosti o brzini dodavanja žice. Vrijeme perioda kratkih spojeva također se smanjuje s porastom brzine dodavanja žice što rezultira većim udjelom perioda električnog luka i prijenosa metala štrcanjem. Kod klasičnog načina prijenos metala kratkim spojevima prelazi u štrcajući luk pri vrijednostima jakosti struje od 180 A.

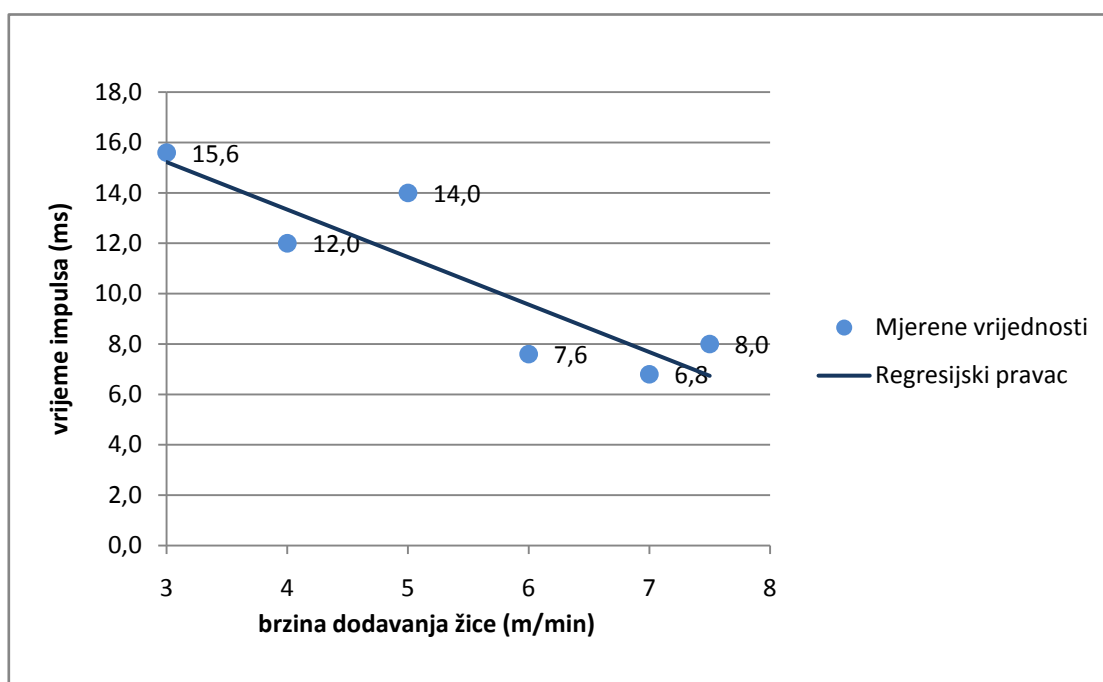


Slika 31. Promjena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO₂)

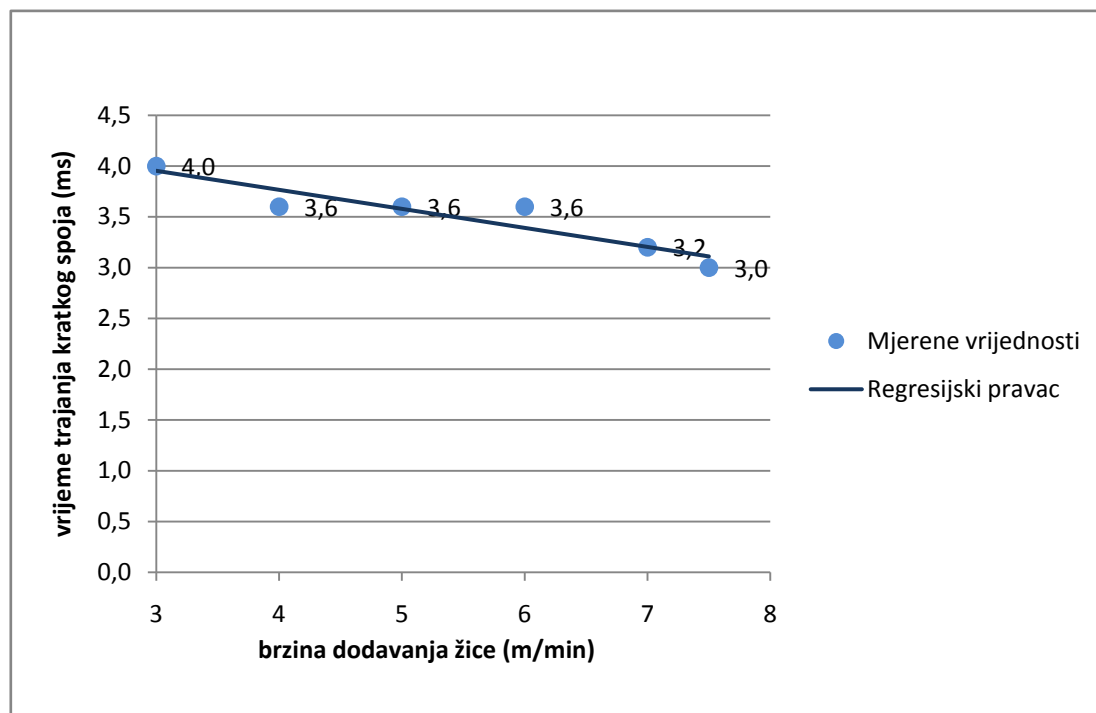


Slika 32. Promjena vremena trajanja kratkog spoja o brzini dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO₂)

Nakon prijenosa klasičnim načinom prikazana je analiza prijenosa metala modificiranim načinom za iste brzine dodavanja žice. Analiza rezultata mjerenja dinamičkih karakteristika struje sa modificiranim CBT načinom prijenosa metala pokazala je očekivane rezultate. Na slici 33 se vidi kako s povećanjem brzine dodavanja žice period trajanja impulsa opada. Slika 34 prikazuje ovisnost vremena trajanja perioda kratkog spoja o brzini dodavanja žice. Sa slike se vidi kako su periodi kratkog spoja neznatno manji s obzirom na povećanje brzine dodavanja žice. Svi oscilogrami pokazuju stabilne i precizno kontrolirane impulse s pravilnim razmacima. Kod zavarivanja s brzinom od 7 m/min počinju se pojavljivati manje nepravilnosti razmaka između impulsa. Nepravilnost može biti uzrokovana nestacionarnim odvajanjem kapljice koja se javlja tijekom snimanja osciloskopom ili zbog greške u samom uređaju za zavarivanje (greška u dovodu žice itd.).

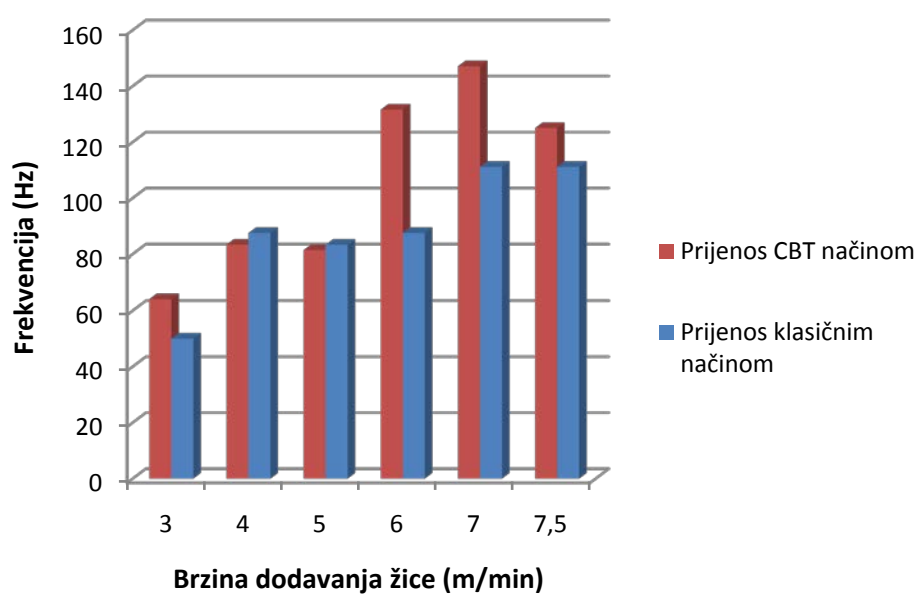


Slika 33. Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO₂)



Slika 34. Promjena vremena trajanja kratkog spoja u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (82 % Ar / 18 % CO₂)

Slika 35 prikazuje uspoređene frekvencije između CBT načina prijenosa metala i klasičnog načina prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi mješavine 82 % Ar / 18 % CO₂. S grafikona se može vidjeti da su frekvencije impulsa tj. broj impulsa u sekundi uglavnom veći kod CBT modificiranog načina prijenosa metala. Razlika između frekvencija posebno dolazi do izražaja pri većim brzinama dodavanja žice (pri 6, 7 i 7,5 m/min) kada kod klasičnog načina dolazi do prijenosa metala štrcajućim lukom. Ta razlika u frekvencijama se počinje smanjivati pri brzini dodavanja žice od 7,5 m/min jer kod modificiranog CBT načina prestaje precizna kontrola dinamičke karakteristike struje i javljaju se različite nepravilnosti.



Slika 35. Grafikon usporedbe frekvencija kod CBT i klasičnog načina prijenosa u ovisnosti o brzini dodavanja žice u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂

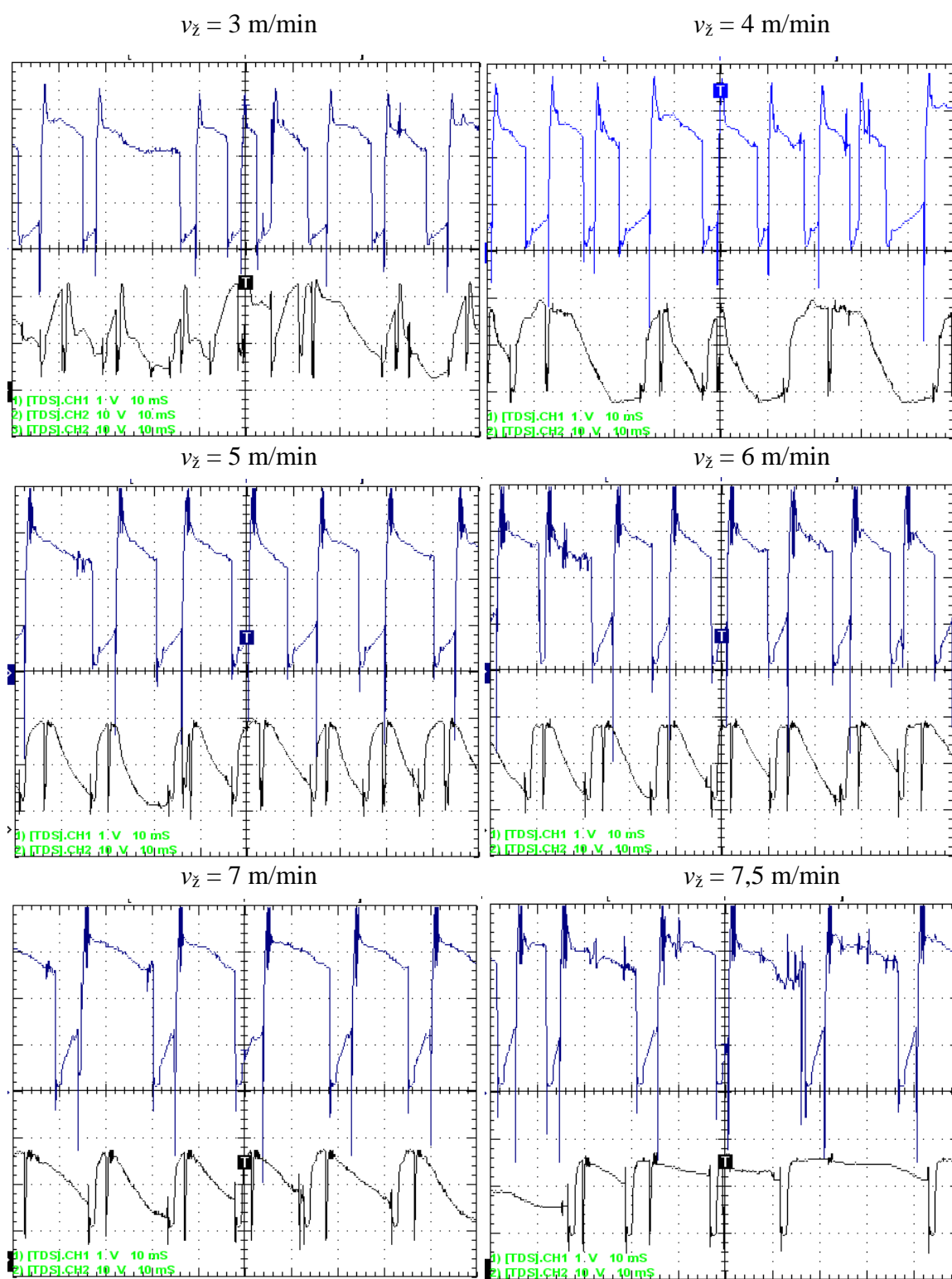
4.3. Snimanje dinamičke karakteristike pri navarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂

Nakon navarivanja i snimanja dinamičkih karakteristika u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂ izvršeno je navarivanje sa zaštitnim plinom 100 % CO₂. Izvršeno je snimanje dinamičkih karakteristika struje i napona pri navarivanju modificiranim CBT načinom i klasičnim načinom prijenosa metala. U tablici 7 su prikazani parametri tijekom variranja brzine dodavanja žice odnosno jakosti struje zavarivanja. Brzina zavarivanja se držala konstantnom na 25 cm/min izuzevši brzine dodavanja žice od 7,5 m/min gdje je povećana na 35 cm/min.

Tablica 7. Parametri navarivanja u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂

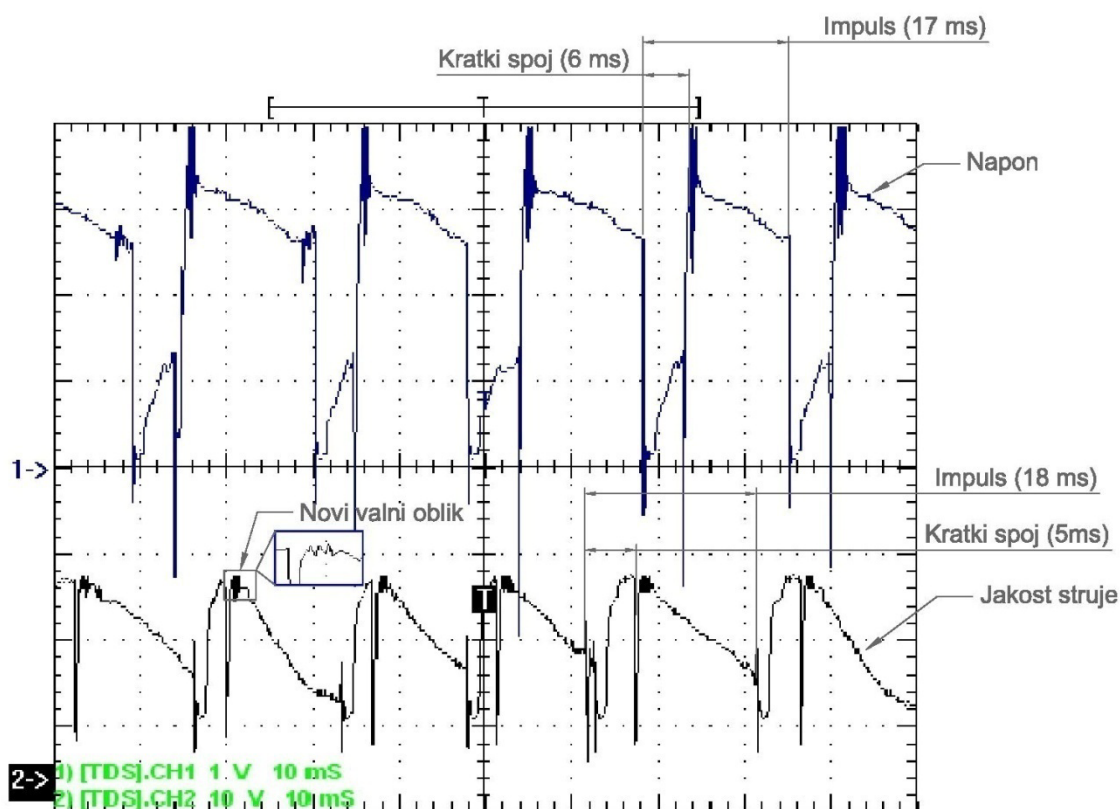
Udio CO ₂ , %	Brzina dodavanja žice, m/min	Očitana jakost struje, A	Očitani napon rada, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Način prijenosa metala, CBT/Klasično
100	3	125	18,5	25	CBT
100	4	150	19	25	CBT
100	5	175	19,9	25	CBT
100	6	190	21	25	CBT
100	7	220	22,8	25	CBT
100	7,5	218	24	35	CBT
100	3	125	19,5	25	Klasično
100	4	150	19,9	25	Klasično
100	5	170	21	25	Klasično
100	6	205	21,5	25	Klasično
100	7	225	24,1	25	Klasično
100	7,5	225	25,2	35	Klasično

Slika 36 prikazuje snimljene oscilograme dinamičkih karakteristika struje i napona pri brzinama dodavanja žice navedenim u tablici 7 za klasični način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂.



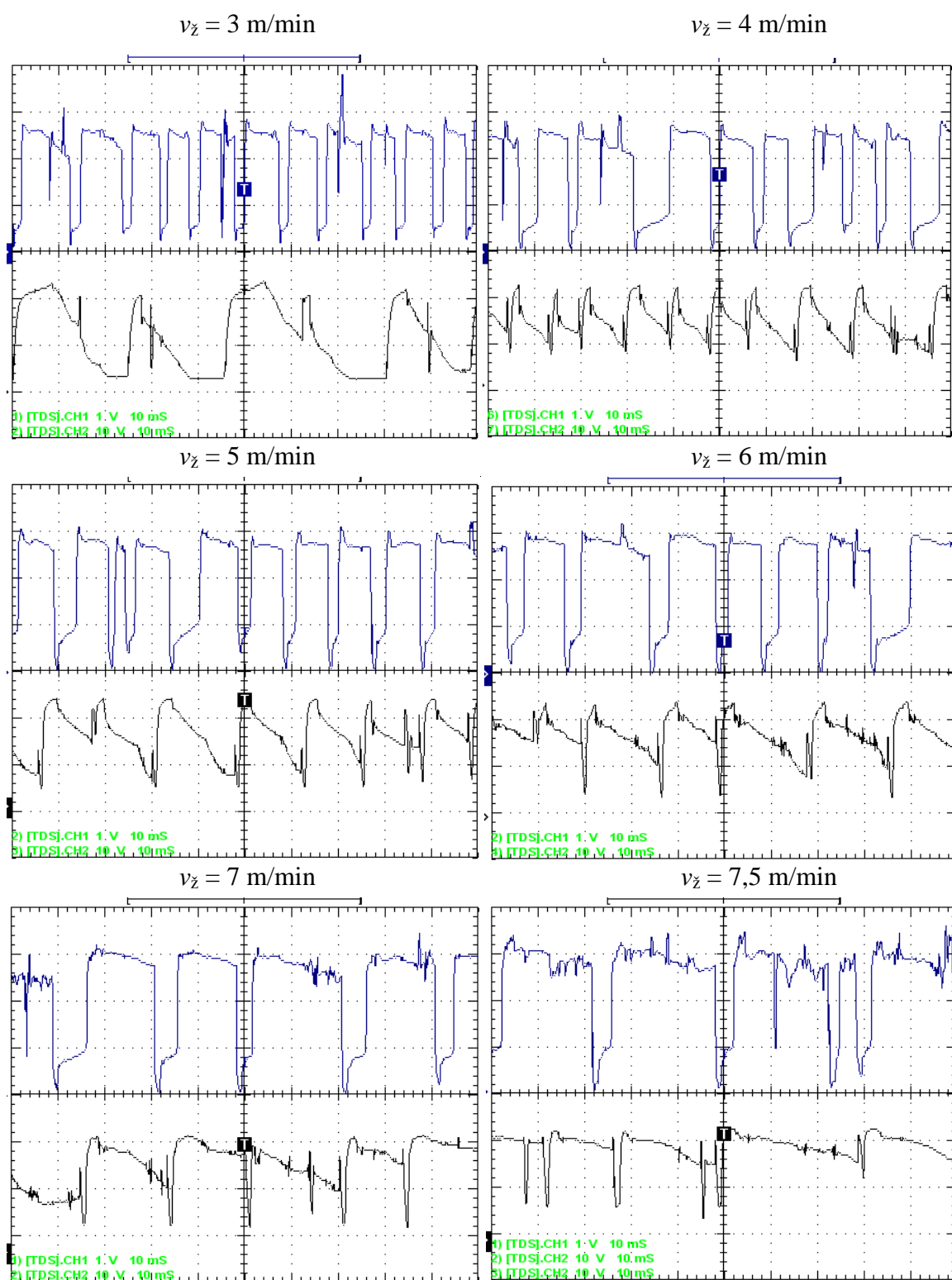
Slika 36. Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u, i = f(t)$, pri modificiranom CBT prijenosu metala (100% CO₂)

Slika 37 prikazuje oscilogram dinamičkih karakteristika struje i napona pri „Low spatter“ – CBT modificiranom načinu prijenosa metala. Brzina dodavanja žice je iznosila 7 m/min, jakost struje 220 A i očitani napon 22 V. Sa slike se može uočiti kako su impulsi i pri ovako relativno velikoj struji vrlo stabilni, a kontrola karakteristike struje precizna. Pri ovolikoj brzini dodavanja žice prijenos metala je krupno kapljičast. Označen je karakterističan trokutasti profil valnog oblika koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka. Na taj način se postiže stabilan prijenos metala i regulacija trajanja električnog luka. Takav oblik dinamičke karakteristike struje je karakterističan za CBT – EX tehnologiju zavarivanja. Na slici 37 su kotirana vremena trajanja impulsa i perioda kratkog spoja za napon i za struju.



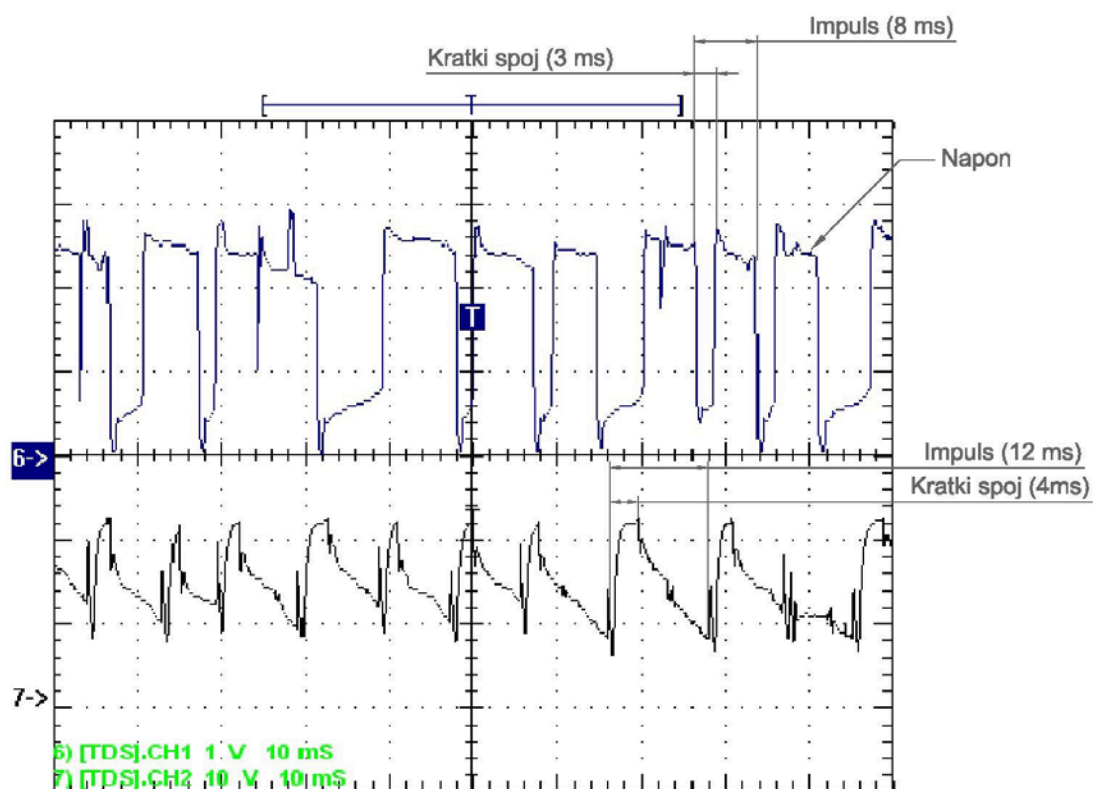
Slika 37. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 7 m/min (100% CO₂)

Slika 38 prikazuje snimljene oscilogramе dinamičkih karakteristika struje i napona pri brzinama dodavanja žice navedenim u tablici 7 za klasični način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂.



Slika 38. Oscilogrami dinamičkih karakteristika $u_i = f(t)$, pri klasičnom načinu prijenosa metala (100% CO₂)

Slika 39 prikazuje oscilogram dinamičkih karakteristika struje i napona pri klasičnom načinu prijenosa metala kod brzine dodavanja žice od 4 m/min. Jakost struje je iznosila 150 A dok je napon iznosio 19,9 V. Sa slike je vidljivo da su impulsi pravilni. Pri ovoj brzini dodavanja žice dinamička karakteristika struje je najstabilnija u odnosu na ostale snimljene karakteristike snimljene pri različitim brzinama dodavanja žice.



Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 4 m/min (100% CO₂)

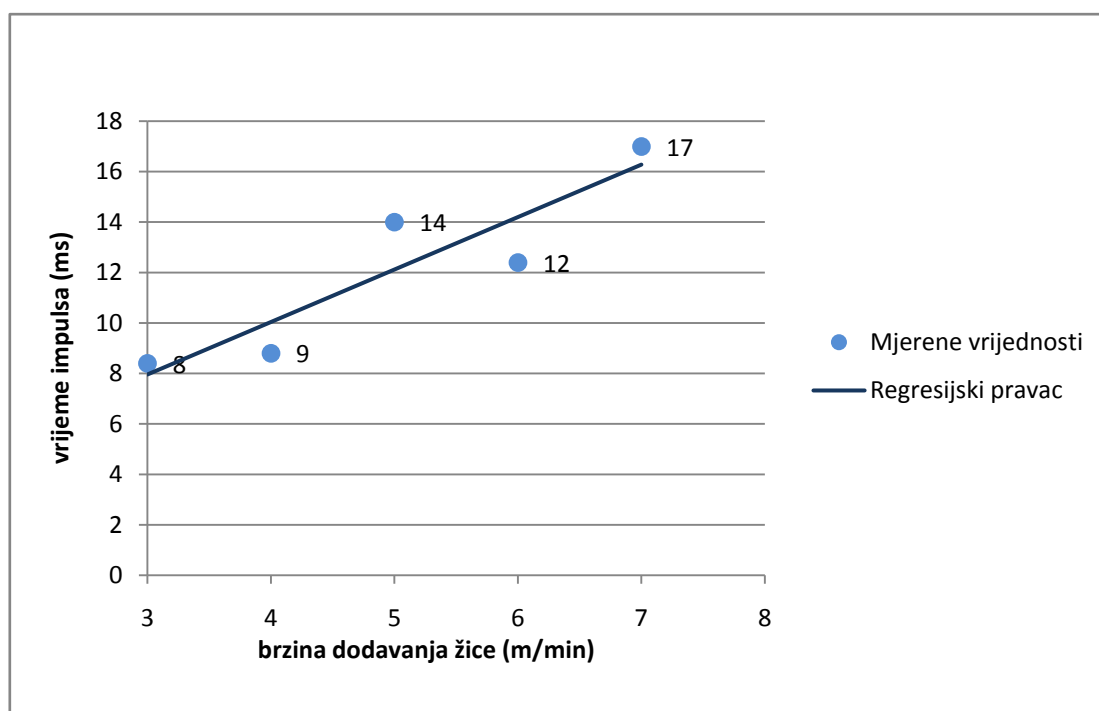
U tablici 8 su prikazana izmjerena vremena trajanja cijelog impulsa i trajanja kratkih spojeva za CBT način prijenosa metala te za klasični način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂. Pri brzini dodavanja žice od 7,5 m/min su se pojavile brojne nepravilnosti kod oba načina prijenosa metala zbog kojih nije bilo moguće izmjeriti točno vrijeme trajanja impulsa (slika 36 i 38).

Slika 40 prikazuje promjenu vremena trajanja cijelog impulsa ovisno o brzini dodavanja žice kod klasičnog načina prijenosa metala. Sa slike je vidljivo da regresijski pravac raste tj. vremena impulsa su dulja. To je bitno različito nego kod navarivanja u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂ gdje je regresijski pravac imao pad (slika 31). To se događa zato što već kod

brzine dodavanja žice od 5 m/min i jakosti struje 170 A dolazi do nepravilnosti u prijenosu metala kratkim spojevima i počinje se javljati prijelazni prijenos metala.

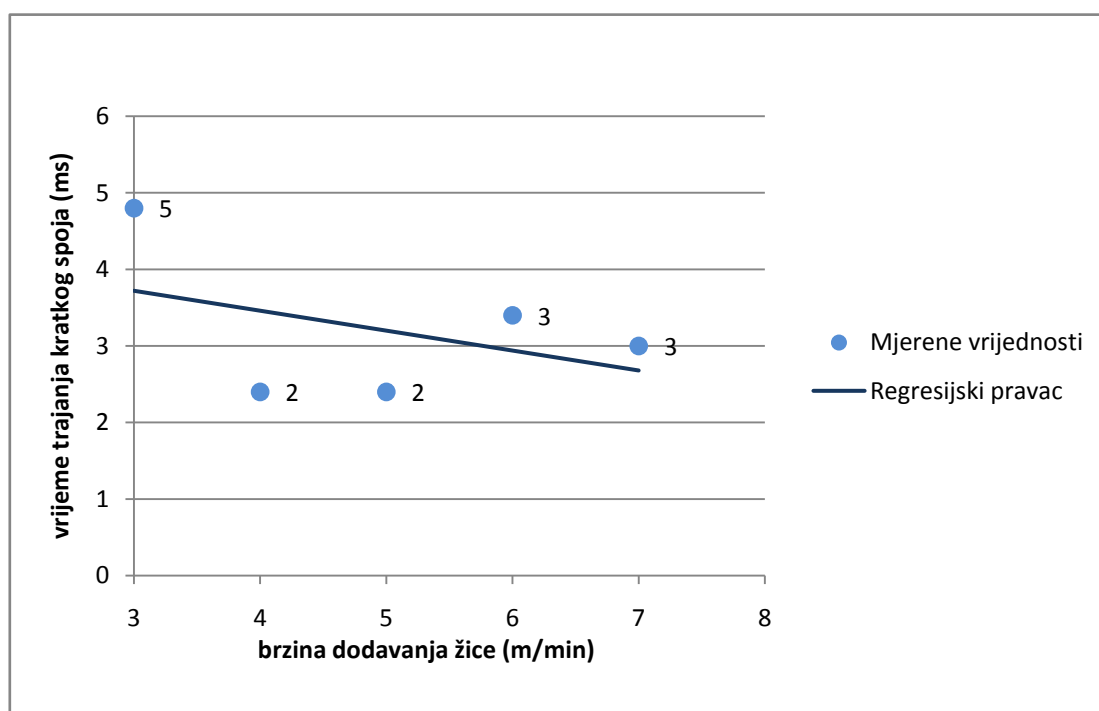
Tablica 8. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod klasičnog i CBT načina prijenosa metala za zaštitni plin 100 % CO₂

Mjerenje trajanja impulsa struje pri 100 % CO ₂				
	Prijenos klasičnim načinom		Prijenos CBT načinom	
Brzina dodavanja žice (m/min)	vrijeme cijelog impulsa (ms)	vrijeme trajanja kratkog spoja (ms)	vrijeme cijelog impulsa (ms)	vrijeme trajanja kratkog spoja (ms)
3	8	5	14	4
4	9	2	13	4
5	14	2	11	7
6	12	3	12	4
7	17	3	14	4
7,5	-	-	-	-



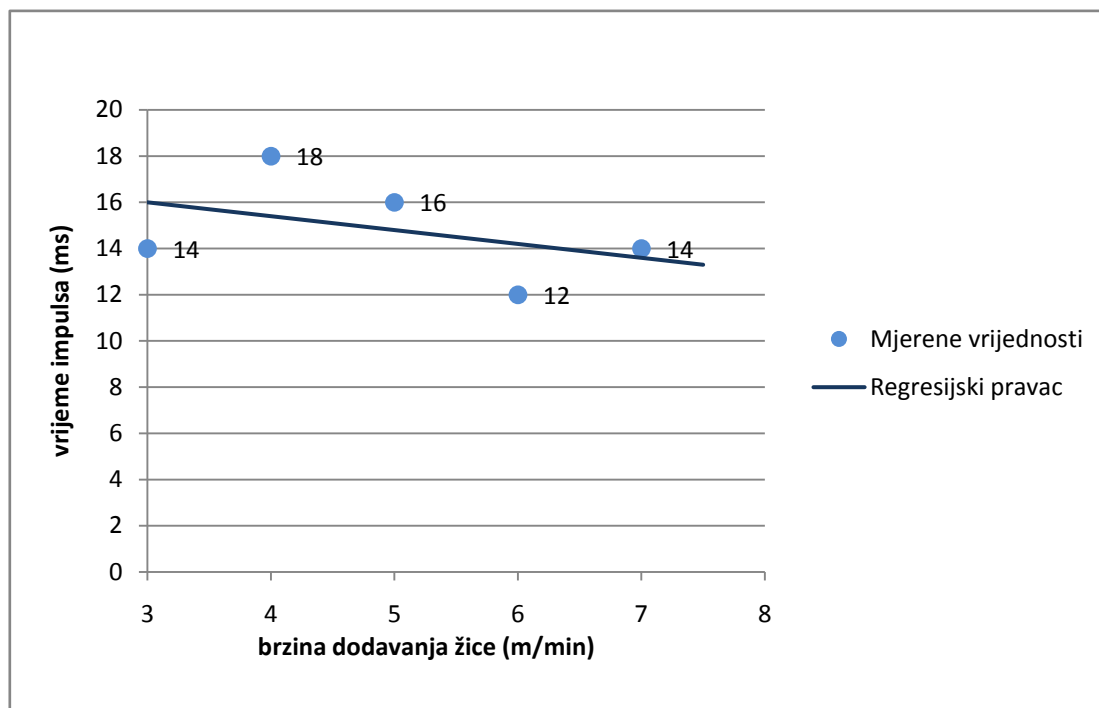
Slika 40. Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnoga načina prijenosa metala (100% CO₂)

Slika 41. prikazuje promjenu vremena trajanja perioda kratkog spoja u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnoga načina prijenosa metala. Vidljivo je da, iako impulsi rastu, period trajanja kratkog spoja se s povećanjem brzine dodavanja žice smanjuje. Rezultat kraćih perioda kratkih spojeva je povećanje vremena trajanja električnog luka. Pošto raste period električnog luka prijenos metala se prestaje odvijati kratkim spojevima već prijelaznim lukom što za posljedicu ima veću količinu depozita, veći unos topline u zavareni spoj i pojavu štrcanja.

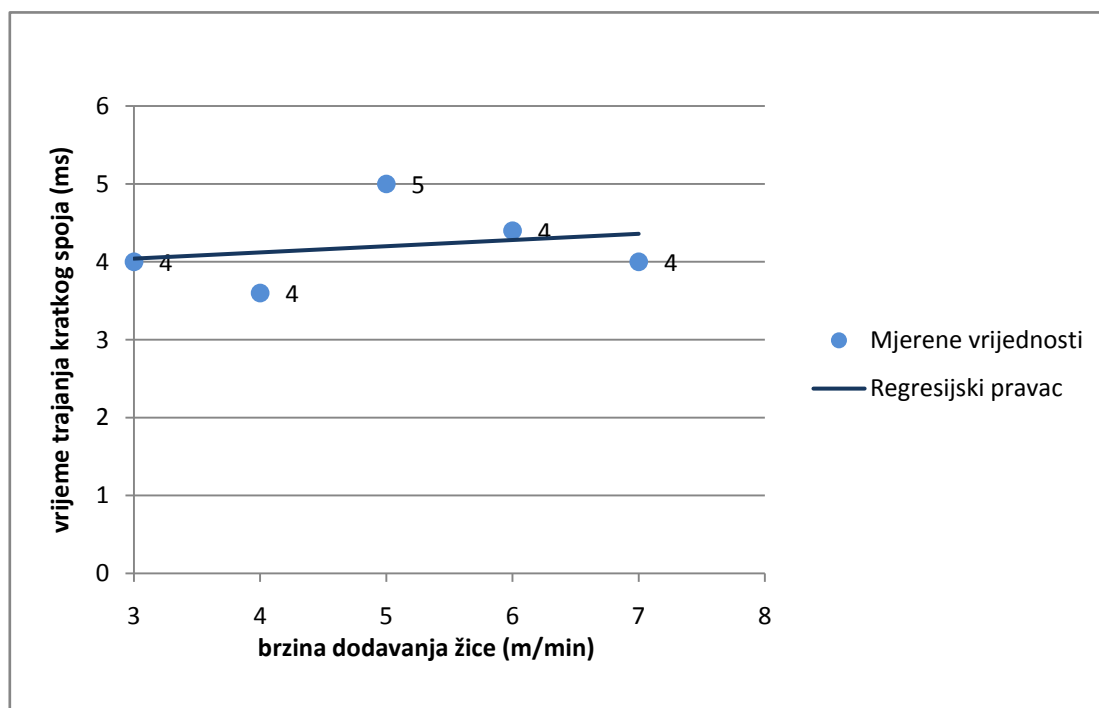


Slika 41. Promjena vremena trajanja perioda kratkih spojeva u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod klasičnoga načina prijenosa metala (100% CO₂)

Slika 42 prikazuje promjenu trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂. Kako se brzina dodavanja žice povećava, tj. raste jakost struje, vrijeme trajanja impulsa pri CBT načinu prijenosa se smanjuje. Proces je bio stabilan sve do brzine dodavanja žice od 7.5 m/min kada kontrola dinamičke karakteristike više nije bila precizna. Slika 43 prikazuje promjenu trajanja perioda kratkih spojeva u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂. Sa slike se vidi da je trajanje kratkih spojeva gotovo konstantno s promjenom brzine dodavanja žice tj. jakosti struje.

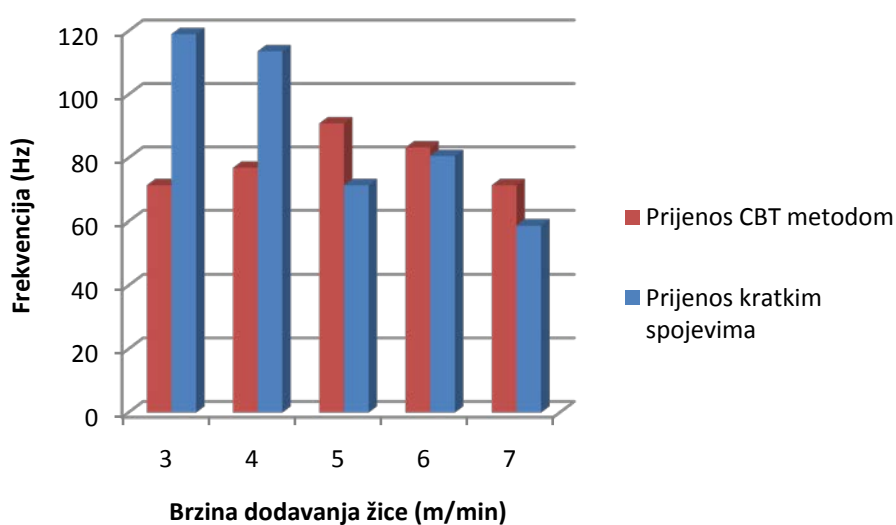


Slika 42. Promjena vremena trajanja impulsa u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranog CBT načina prijenosa metala (100% CO₂)



Slika 43. Promjena vremena trajanja perioda kratkih spojeva u ovisnosti od brzine dodavanja žice kod modificiranoga CBT načina prijenosa metala (100% CO₂)

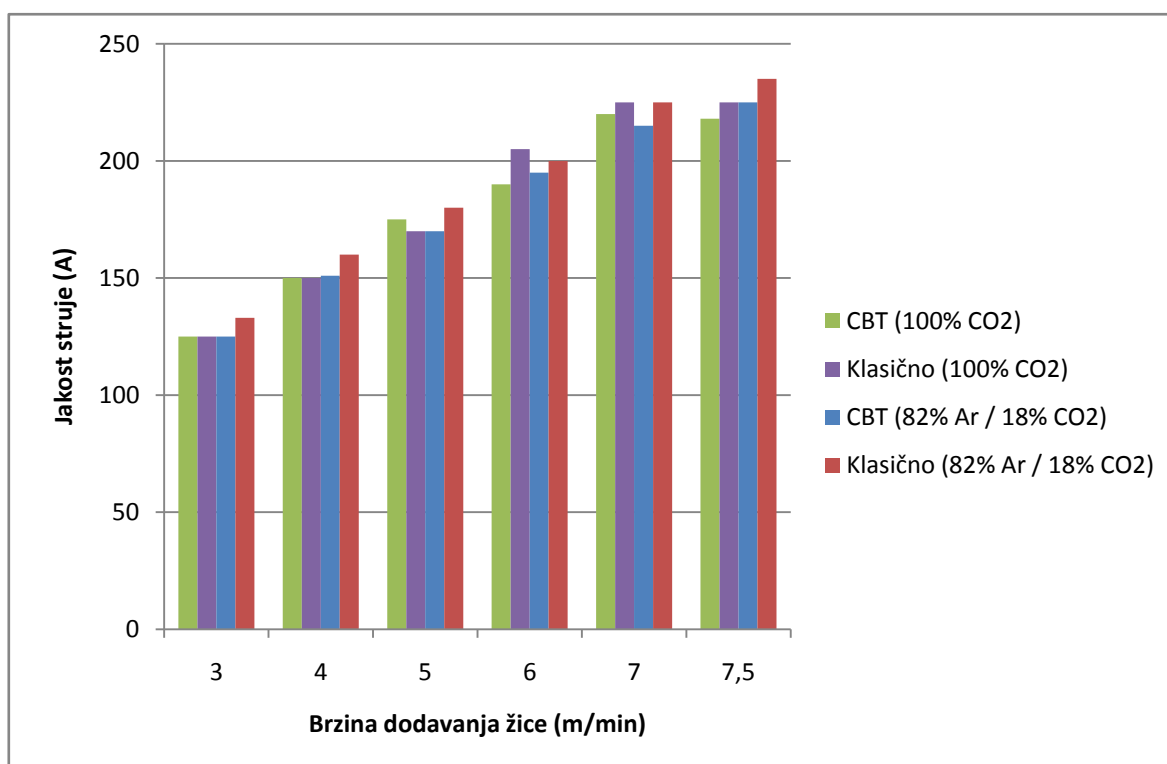
Grafikon usporedbe frekvencija kod CBT i klasičnog načina prijenosa u ovisnosti o brzini dodavanja žice u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ prikazan je na slici 44. Iz njega se može vidjeti kako je frekvencija kod klasičnog načina bila daleko veća nego kod CBT načina prijenosa metala pri brzinama dodavanja žice od 3 m/min odnosno 4 m/min. Pri većim brzinama je ipak veća frekvencija kod modificiranog načina prijenosa metala zbog bolje stabilnosti procesa.



Slika 44. Grafikon usporedbe frekvencija kod CBT i klasičnog načina prijenosa u ovisnosti o brzini dodavanja žice u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂

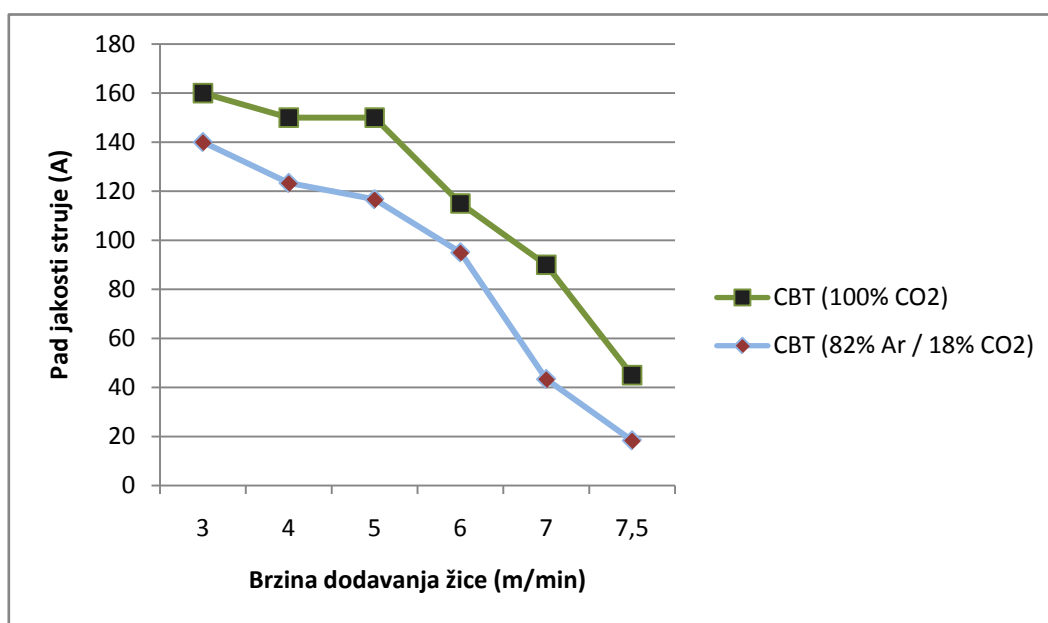
4.4. Analiza jakosti struje ovisno o vrsti plina i brzini dodavanja žice

Slika 45 prikazuje grafikon uspoređenih podataka jakosti struje pri različitim brzinama dodavanja žice za sve izvedene postupke zavarivanja, tj. za modificirani CBT i klasični način prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ i za mješavinu 82 % Ar / 18 % CO₂. Vrijednosti iz grafikona su prikazane u tablici 5 i tablici 6. S grafikona se vidi da razlike u jakosti struja nisu velike ali jakost struje kod klasičnog načina zavarivanja u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂ je gotovo uvijek veća od ostalih vrijednosti za 10 A.



Slika 45. Grafikon vrijednosti jakosti struja zavarivanja u ovisnosti o brzini dodavanja žice

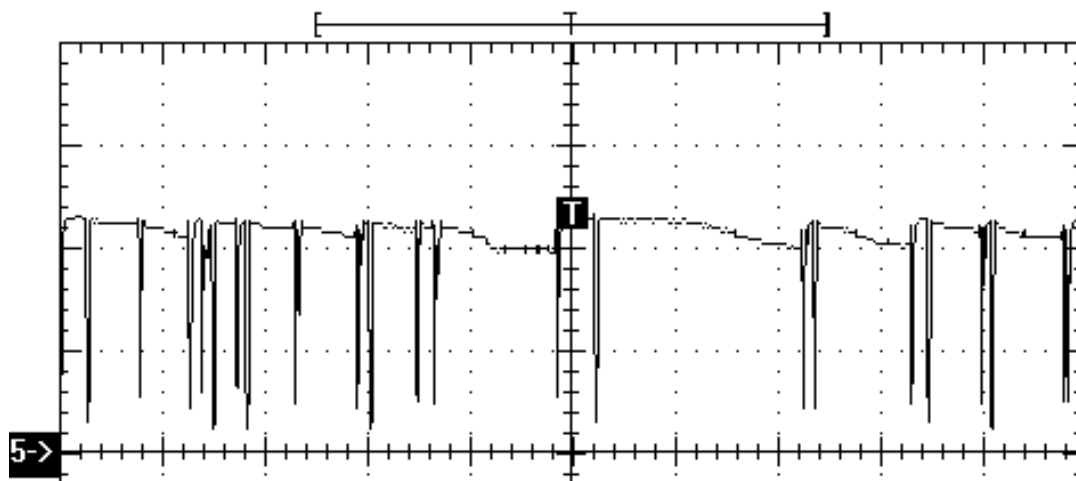
Na slici 46 su prikazani iznosi pada jakosti struje zavarivanja na nominalnu vrijednost jakosti struje za vrijeme perioda električnog luka kod modificiranog CBT načina prijenosa metala. Sa slike se vidi kako je pad jakosti struje sve manji. Takvi rezultati su bili za očekivati zato što nakon velikog porasta struje u periodu kratkog spoja struja za vrijeme električnog luka pada na nominalnu vrijednost jakosti struje. Pošto se povećanjem brzine žice povećava i nominalna vrijednost jakosti struje, pad jakosti struje će biti sve manji s većom brzinom žice. Na slici se može vidjeti da su vrijednosti pada jakosti struje za vrijeme električnog luka u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ veće nego kod zaštitne atmosfere mješavine 82 % Ar / 18 % CO₂. To se moglo očekivati zato što zaštitna atmosfera 82 % Ar / 18 % CO₂ ima niži ionizacijski potencijal što znači i bolju električnu provodljivost (manji električni otpor) u odnosu na zaštitnu atmosferu 100 % CO₂ [21].



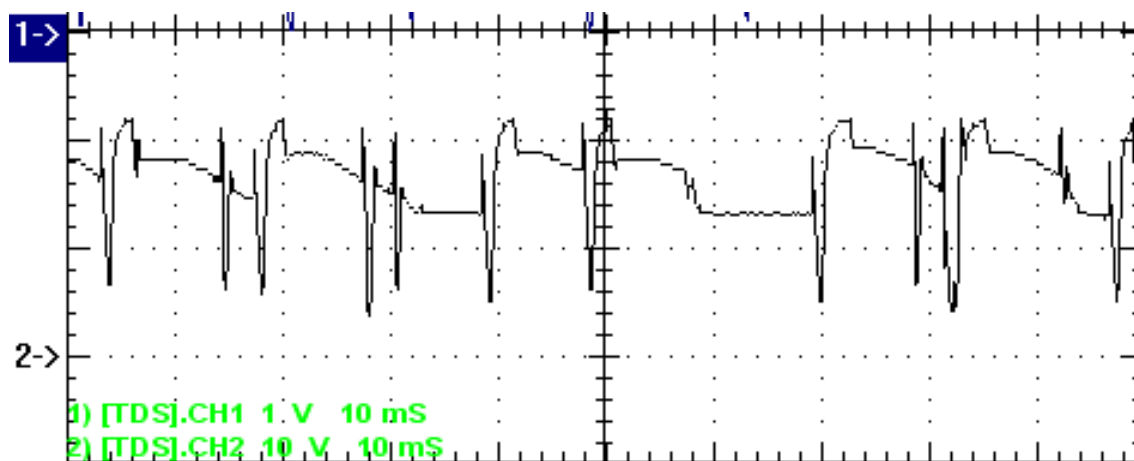
Slika 46. Pad jakosti struje za vrijeme perioda električnog luka pri različitim vrijednostima brzina dodavanja žice

Slika 47 prikazuje oscilogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$ pri modificiranom CBT prijenosu metala kod brzine dodavanja žice od 8 m/min u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂. Jakost struje je iznosila 250 A i pri ovoj vrijednosti jakosti struje CBT – EX način prijenosa metala je prestao biti stabilan tj. dinamička karakteristika jakosti struje nije precizno kontrolirana. Na slici 48 je prikazan oscilogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$ pri klasičnom prijenosu metala kod brzine dodavanja žice od 5 m/min u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 %

CO₂. Pri brzini dodavanja žice od 5 m/min vrijednost jakosti struje je iznosila 180 A. Može se primjetiti da pri jakosti struje od 180 A kod klasičnog luka prijenos metala kratkim spojevima prelazi u prijenos metala prijelaznim lukom te se javlja pojava štrcanja koja se želi izbjeći modificiranim prijenosima metala. U zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ dobiveni rezultati su gotovo isti kao u zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂.



Slika 47. Oscillogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$, pri modificiranom CBT prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 8 m/min (82 % Ar / 18 % CO₂)



Slika 48. Oscillogram dinamičke karakteristike $i = f(t)$, pri klasičnom prijenosu metala pri brzini dodavanja žice 5 m/min (82 % Ar / 18 % CO₂)

5. ZAKLJUČAK

MAG CBT je modificirani postupak zavarivanja kojim se žele ukloniti nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima tj. klasičnim načinom i povećati produktivnost. Najveći nedostatak klasičnog načina prijenosa metala je pojava štrcanja te se ona uspješno smanjuje ili uklanja pomoću MAG CBT postupka zavarivanja. Smanjenje pojave štrcanja se postiže novorazvijenim, visokopreciznim i visokobrzinskim Welbee mikroprocesorom. Welbee mikroprocesor omogućuje precizno predviđanje pojave električnog luka, smanjeni unos topline i formiranje rastaljene kapljice pomoću precizne regulacije duljine električnog luka. Klasični način prijenosa metala kratkim spojevima rezultira najmanjim unosom topline, ali i malim depozitom s obzirom na ostale klasične prijenose metala. Modificiranim CBT načinom prijenosa se omogućava manji unos topline uz veće brzine zavarivanja i depozit.

Analiziranjem snimljenih dinamičkih karakteristika jakosti struje u eksperimentalnom dijelu ovog rada, definirano je pri kojim vrijednostima brzine dodavanja žice procesi odvajanja kapljice postaju nestabilni ovisno o zaštitnoj atmosferi.

U zaštitnoj atmosferi 82 % Ar / 18 % CO₂ prijenos metala klasičnim načinom postaje nestabilan pri brzini dodavanja žice od 5 m/min što odgovara jakosti struje zavarivanja od otprilike 180 A gdje dolazi do prijelaznog načina prijenosa metala. Modificirani CBT način prijenosa metala je stabilan do brzine dodavanja žice 8 m/min što odgovara jakosti struje od 250 A. Vremena trajanja impulsa u oba načina prijenosa metala regresijski padaju s povećanjem brzine dodavanja žice. Frekvencija kod CBT načina prijenosa metala je veća nego kod klasičnog načina za sve brzine dodavanja žice. Razlike u frekvenciji između CBT i klasičnog načina prijenosa metala najviše dolaze do izražaja pri brzinama dodavanja žice većim od 5 m/min zbog nestabilnosti procesa odvajanja kapljice kod klasičnog načina prijenosa metala.

U zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ prijenos metala klasičnim načinom je najstabilniji pri brzini dodavanja žice od 4 m/min, ali već pri brzini od 5 m/min i jakosti struje zavarivanja od 175 A se stabilnost gubi i dolazi do pojave štrcanja. CBT način prijenosa metala omogućuje stabilan prijenos metala do brzine dodavanja žice od 7,5 m/min i jakosti struje zavarivanja od 220 A kada se mogu primijetiti povremene nepravilnosti. U zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂ vremena trajanja impulsa kod klasičnog načina rastu s porastom brzine dodavanja žice. Vremena trajanja impulsa kod CBT načina prijenosa metala padaju s porastom brzine dodavanja žice.

Frekvencija je veća kod klasičnog načina prijenosa metala do brzine dodavanja žice od 5 m/min dok je proces stabilan, a pri većim brzinama frekvencija je veća kod CBT načina prijenosa metala.

Pad jakosti struje zavarivanja na nominalnu vrijednost jakosti struje za vrijeme perioda električnog luka kod modificiranog CBT načina prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ je veći nego u zaštitnoj atmosferi 82% Ar / 18% CO₂.

Može se zaključiti da su optimalni parametri rada klasičnog načina prijenosa metala kratkim spojevima u rasponu brzina dodavanja žice od 3 m/min do 5 m/min. Modificiranim CBT načinom prijenosa metala se postiže stabilnost procesa odvajanja kapljice u rasponu brzina dodavanja žice od 3 m/min do 7 m/min. Vidljivo je da modificirani CBT način prijenosa metala ima veći raspon brzina dodavanja žice pri kojima su stabilne dinamičke karakteristike jakosti struje i napona zavarivanja. Prema tome CBT način prijenosa metala je poželjno koristiti pri vrijednostima brzina dodavanja žice tj. jakosti struje zavarivanja kada kod klasičnog načina dolazi do prijenosa metala prijelaznim lukom.

LITERATURA

- [1] Puče, Andro: Određivanje dinamičke karakteristike MAG zavarivanja, Završni rad, FSB Zagreb, 2014.
- [2] Garašić, I.; Kožuh, Z.; Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju, Zavarivanje vol. 57, str. 85 – 92, Zagreb, 2014.
- [3] Kralj, Slobodan: skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1
- [4] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>, dostupno 4.12.2014
- [5] Delač, Domagoj: Klasifikacija postupaka zavarivanja prema normi HRN EN ISO 4063, Završni rad, FSB Zagreb, 2014.
- [6] Bajs, Marko: Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, Završni rad, FSB Zagreb, 2013.
- [7] Guidelines For Gas Metal Arc Welding,
https://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf , dostupno 4.12.2014.
- [8] http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook , dostupno 4.12.2014.
- [9] Rudan, Marijan: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. seminar, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 24.05.2007
- [10] Messer, zaštitni plinovi za zavarivanje,
http://www.messergroup.com/mostar/O_nama/Za_titni_plinovi_za_zavarivanje_.pdf,
dostupno 5.1.2015.
- [11] Era, Tatsuo; Ide, Akinobu; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Hirata, Yoshinori: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining, Osaka University, Osaka, Japan, 2011
- [12] Era, Tatsuo; Ide, Akinobu; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Yamamoto, Hideyuki: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc. No. XII-1900-06
- [13] Era, Tatsuo; Uezono, Toshiro; Ueyama Tomoyuki; Yamamoto, Hideyuki: Development of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process, IIW Doc. No. XII-1937-08

-
- [14] Era, T.; Uezono, T.; Kadota, K.; Hata, S.; Ueyama, T.: „Leading edge of current waveform control technology on digital inverter controlled welding power source and its peripheral equipment“, Zavarivanje vol.57, str. 5-16, Zagreb, 2014
- [15] Petrović, Vedran: Moderni robotski sustavi za elektrolučno zavarivanje, Diplomski rad, FSB Zagreb; 2010.
- [16] OTC Daihen, Welbee series, http://www.otcdaihenasia.com/product-detail.asp?product_id=25, dostupno 5.1.2015.
- [17] <http://weldinganswers.com/category/welding-processes/gmaw-process>, dostupno: 5.1.2015.
- [18] Dinamička karakteristika izvora struje modificiranih uređaja za MIG/MAG zavarivanje, <https://www.scribd.com/doc/90211165/Dinami%C4%8Dka-karakteristika>, dostupno: 8.1.2015.
- [19] R. W. Messler Jr.: Principles of welding – Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy, Wiley-VCH, 1999.
- [20] Garašić, I.; Remenar, M.; Kufrin, T.: Zavarivanje MIG/MAG promijenjivim polaritetom – posebnosti i primjena, Zavarivanje vol.57, str.17-23, Zagreb, 2014.
- [21] http://www.awssection.org/uploads/longisland/files/Praxair_Shielding_Gas_Manual.pdf dostupno: 6.1.2015.

PRILOZI

- I. CD-R disc – pdf verzija završnog rada